



ศัทยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร
และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร



โดย
นายณัฐพล เสวตบุตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ศัทยภาพการผลิตก้าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร
และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

BIOCHEMICAL METHANE POTENTIAL GENERATED BY THE CO-DIGESTION OF
FOOD WASTE AND CELLULOSE-BASED FOOD PACKAGING PRODUCT



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE

Silpakorn University

Academic Year 2022

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร
และผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร
โดย นายณัฐพล เสวตบุตร
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก อาจารย์ ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

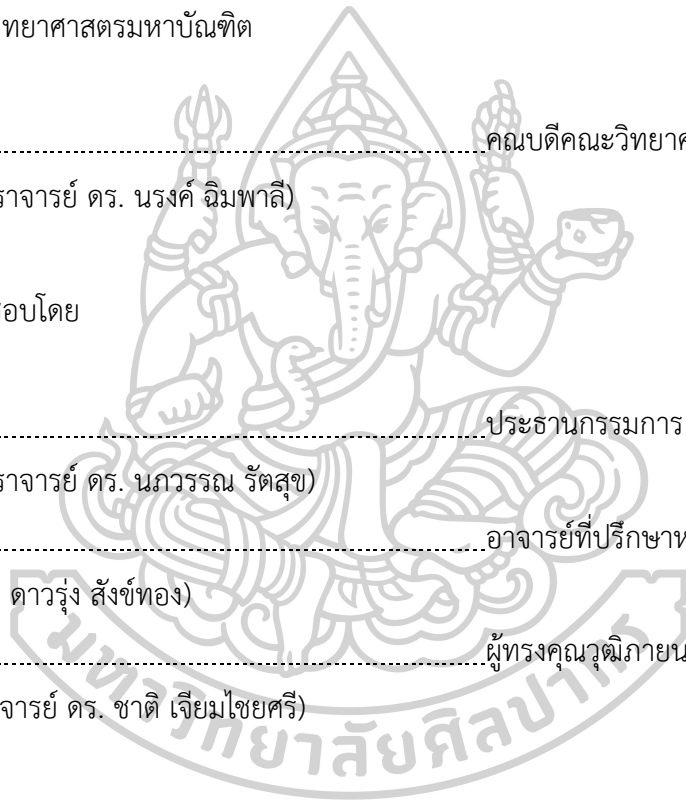
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ ฉิมพาลี)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภวรรณ รัตสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชชาติ เจริญไชยศรี)



60311301 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน, กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน, การหมักร่วม, เศษอาหาร, ผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร

นาย ธีรพล เสวตบุตร: ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง

การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม (Anaerobic co-digestion, AcoD) ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนให้สูงขึ้นได้ และปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum, I) ที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมให้ระบบมีความเสถียรและให้ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สูงขึ้นได้เช่นกัน ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการตรวจสอบศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร (Food waste, FW) และผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร (Cellulose-based food packaging product, CFPP) ที่อุณหภูมิระดับปานกลาง (35 ± 2 องศาเซลเซียส) ในรูปแบบแบดจ์เป็นระยะเวลา 60 วัน โดยประกอบด้วยการทดลอง 2 ชุด สำหรับการทดลองชุดที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพื่อการผลิตก๊าซมีเทน มีอัตราส่วน FW/CFPP ที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) และมีการใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 2 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) ส่วนการทดลองชุดที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1 มีอัตราส่วน I/S ที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษากาลพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นของการทดลองทั้ง 2 ชุด โดยใช้ Modified Gompertz model ด้วย เมื่อพิจารณาผลการศึกษาด้านศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน พบว่า ในการทดลองชุดที่ 1 ที่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน FW/CFPP 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 โดยมีค่าผลผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 505.87 474.88 451.23 420.35 392.35 และ 393.28 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมใกล้เคียงกันและมีปริมาณสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน FW/CFPP 20:80 0:100 80:20 และ 100:0 โดยมีค่าผลผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 439.63 423.24 368.05 307.04 157.14 และ 99.48 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ สำหรับการทดลองชุดที่ 2 ซึ่งใช้อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 เมื่อมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต อัตราส่วน I/S 2:1 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน I/S 2.5:1 1.5:1 1:1 และ 0.5:1 โดยมีค่าผลผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 451.23 442.12 418.84 402.38 และ 387.66 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต พบว่า อัตราส่วน I/S 2.5:1 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน I/S 2:1 1.5:1 1:1 และ 0.5:1 โดยมีค่าผลผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 457.88 435.14 204.83 182.24 และ 40.26 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการศึกษาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมระบบให้มีความสมดุล รวมถึงการใช้อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น สามารถช่วยส่งเสริมให้กระบวนการย่อยสลายมีความเสถียรและมีผลผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลการศึกษากาลพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร พบว่า สมการ Modified Gompertz model เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำและเหมาะสมในการใช้ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของทั้ง 2 ชุดการทดลอง และพารามิเตอร์ทางกลศาสตร์ แสดงให้เห็นว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารมีการผลิตก๊าซมีเทนในอัตราที่เร็วกว่าการหมักโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว และอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นช่วยส่งเสริมให้ระบบมีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

60311301 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : BIOCHEMICAL METHANE POTENTIAL, ANAEROBIC DIGESTION, CO-DIGESTION, FOOD WASTE, CELLULOSE-BASED FOOD PACKAGING PRODUCT

MR. Nattapon SAWETTABOOT : BIOCHEMICAL METHANE POTENTIAL GENERATED BY THE CO-DIGESTION OF FOOD WASTE AND CELLULOSE-BASED FOOD PACKAGING PRODUCT Thesis advisor : Daorong Sungthong, Ph.D.

Anaerobic co-digestion (AcoD) is proven to be a promising technology for enhancing the production of methane. Also, the inoculation dose (Inoculum, I) used in digestion is another crucial factor for improving high methane yield and digester stability. So, in this study, the biochemical methane potential (BMP) from anaerobic co-digestion of food waste (FW) and cellulose-based food packaging product (CFPP) was carried out under mesophilic ($35 \pm 2^\circ\text{C}$) condition in a batch mode for 60 days. Two sets of experiments were conducted. Experiment I aimed to determine the suitable ratio of FW/CFPP for methane production, including ratios of 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, and 0:100 (based on volatile solids, VS), with an inoculum-to-substrate (I/S) ratio of 2 (based on VS). Experiment II aimed to study the influence of different I/S ratios on methane production using the favorable ratio of FW:CFPP determined from Experiment I with I/S ratios of 0.5:1, 1:1, 1.5:1, 2:1, and 2.5:1 (based on VS). A Modified Gompertz model was also applied to describe both experiments' kinetics of methane production. Based on the BMP experimental results, it is found that in experiment I with the set of having sodium bicarbonate (NaHCO_3) addition, the highest cumulative methane yield was observed in FW/CFPP 100:0, followed by 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, and 0:100 with the values of 505.87, 474.88, 451.23, 420.35, 392.35, and 393.28 NmL/gVS , respectively. Nevertheless, when compared to the set without NaHCO_3 addition, the methane yields were insignificantly different and highest in FW/CFPP 60:40 and 40:60, followed by 20:80, 0:100, 80:20, and 100:0 with the values of 439.63, 423.24, 368.05, 307.04, 157.14, and 99.48 NmL/gVS , respectively. In experiment II with the use of FW/CFPP 60:40 and the addition of NaHCO_3 , the cumulative methane yield was found to be highest in I/S 2:1, followed by 2.5:1, 1.5:1, 1:1, and 0.5:1 with the values of 451.23, 442.12, 418.84, 402.38, and 387.66 NmL/gVS , respectively. However, when compared to the set with no NaHCO_3 addition, I/S 2.5:1 produced the highest cumulative methane yield, followed by 2:1, 1.5:1, 1:1, and 0.5:1 with the values of 457.88, 435.14, 204.83, 182.24, and 40.26 NmL/gVS , respectively. These findings demonstrate that the addition of NaHCO_3 and the utilization of a larger ratio of I/S in the anaerobic co-digestion of FW and CFPP can establish the digester stability and improve high methane yield. Considering the kinetics study of methane production from the anaerobic co-digestion of FW and CFPP, it can be seen that the Modified Gompertz model was accurate and appropriate in predicting the methane prediction of both experiments. Besides, their kinetics parameters reveal that the co-digestion of FW/CFPP had a faster methane production rate than the mono-digestion of FW or CFPP, and a larger ratio of I/S also increased the methane production rate.

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาและการทำวิจัยในระดับปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ณ สถานที่แห่งนี้ (ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร) ได้ส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้เรียนรู้และพัฒนาศักยภาพของตนเองในด้านต่าง ๆ มากมาย ทั้งในเรื่องของทักษะ มุมมอง ความรู้ความเข้าใจ ตลอดจนเพิ่มพูนความสามารถในด้านงานวิจัยทางสิ่งแวดล้อมจนมีความชำนาญมากยิ่งขึ้น และได้ทำให้ข้าพเจ้าสามารถดึงศักยภาพในด้านต่าง ๆ เหล่านั้นมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าในระหว่างการดำเนินงานวิจัยเป็นช่วงเวลาที่ทั้งโลกกำลังประสบกับสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) โรคอุบัติใหม่ ซึ่งกินระยะเวลา 2 – 3 ปี (พ.ศ. 2562 – 2565) จนส่งผลกระทบต่อให้ข้าพเจ้าไม่สามารถดำเนินงานวิจัยและเก็บตัวอย่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยได้เป็นระยะเวลาหนึ่ง ทำให้ข้าพเจ้าไม่สามารถดำเนินงานวิจัยให้บรรลุได้ตามเป้าหมายและแผนงานที่วางไว้ แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยแรงสนับสนุน กำลังใจ คำแนะนำ และคำสอนด้วยความห่วงใยที่ดีเสมอมาของบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ก็ได้ช่วยผลักดันและส่งเสริมให้ข้าพเจ้าดำเนินงานวิจัยต่อไปได้เป็นอย่างดี ซึ่งข้าพเจ้าต้องขอกล่าวขอบคุณทุกท่านและทุกหน่วยงานด้วยความซาบซึ้งใจที่มีส่วนสำคัญอย่างมากต่อข้าพเจ้าในการดำเนินงานวิจัยนี้ให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

อันดับแรกข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ดาวรุ่ง สังข์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำอย่างใกล้ชิด ช่วยวางแผนการดำเนินงาน และช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ที่ข้าพเจ้ายังขาดพร่อง จนข้าพเจ้ามีความรู้ความเข้าใจมากยิ่งขึ้น และสามารถนำความรู้ต่าง ๆ เหล่านั้นมาใช้ในการดำเนินงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพและราบรื่นเป็นอย่างดี รวมถึงให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงลงได้ นอกจากนี้ยังเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าสามารถผ่านปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ได้เป็นอย่างดีเสมอมา

ลำดับต่อมาข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจริญไชยศรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาและเสียสละเวลาให้คำแนะนำต่าง ๆ เพิ่มเติม จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตา ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้าในด้านต่าง ๆ จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จอย่างลุล่วง

ขอขอบคุณหน่วยงานในสังกัดมหาวิทยาลัยศิลปากร ได้แก่ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยบางส่วน รวมถึงขอขอบคุณ บริษัท บรรจุกภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์

ขอขอบคุณคุณเอกมล พรหมโสภา เจ้าหน้าที่ด้านสิ่งแวดล้อม ของ บริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ที่ให้ความเมตตาในเรื่องการประสานงานระหว่างข้าพเจ้ากับหน่วยงานต้นสังกัด เพื่อขออนุญาตเข้าไปยังพื้นที่โรงงานฯ และเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19)

ขอขอบคุณบุคคลสำคัญต่าง ๆ รอบตัวข้าพเจ้า ผู้ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนข้าพเจ้าในด้านการดำเนินงานวิจัย และด้านอื่น ๆ ด้วยความเต็มใจและห่วงใยเสมอมา

สุดท้าย ข้าพเจ้าจึงขอยกกุศลใด ๆ อันเกิดจากงานวิจัยนี้แก่กลุ่มบุคคลกลุ่มหนึ่งที่มีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถฟันฝ่าอุปสรรคต่าง ๆ ในระหว่างดำเนินงานวิจัย นั่นคือ “คุณพ่อสัญญาชัย คุณแม่ละออวรรณ และน้องนิว” ที่คอยเป็นแรงสนับสนุนอยู่เบื้องหลัง ให้กำลังใจ ให้ความสะดวกสบายทั้งกายและจิตใจ อยู่เคียงข้างและเข้าใจข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา จนข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยเสร็จลุล่วงได้ด้วยดีที่สุดในที่สุด

สารบัญ

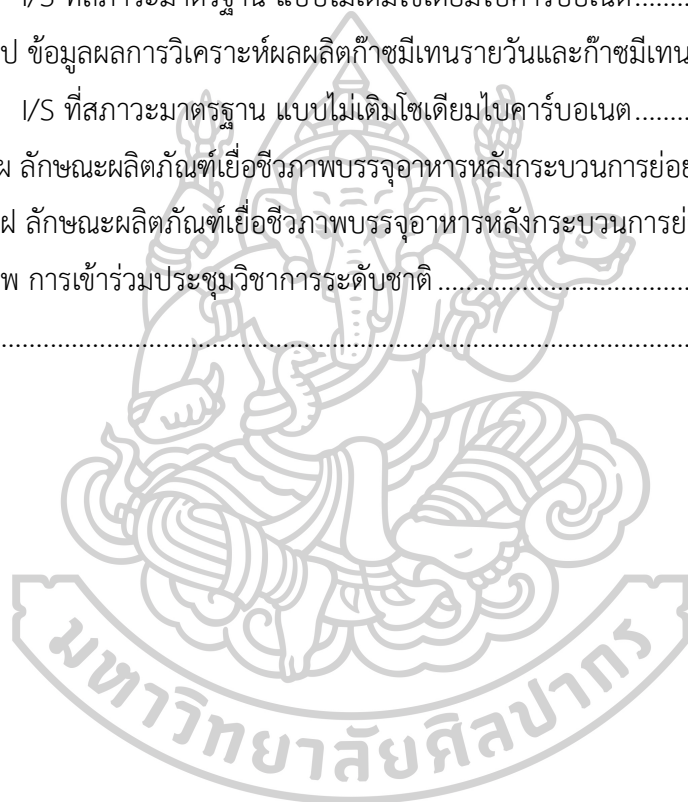
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3สมมติฐานการศึกษา.....	6
1.4ขอบเขตการศึกษา.....	6
1.5ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร.....	9
2.1กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	9
2.1.1 การไฮโดรไลซิส.....	9
2.1.2 การสร้างกรด.....	12
2.1.3 การสร้างกรดอะซิติก.....	13
2.1.4 การสร้างมีเทน.....	14
2.2ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	16
2.2.1 อุณหภูมิ.....	17
2.2.2 พีเอช.....	21
2.2.3 ความเป็นต่าง.....	22
2.2.4 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย.....	25
2.2.5 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน.....	27
2.2.6 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์.....	30
2.2.7 ระยะเวลาการกักเก็บ.....	31
2.2.8 ความชื้น.....	34

2.2.9 สารอาหาร	35
2.2.10 สารที่เป็นพิษ	36
2.3องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ	41
2.4การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม	43
2.5วัสดุตั้งต้นสำหรับการหมักร่วม.....	45
2.5.1 เศษอาหาร	48
2.5.2 ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร	51
2.6ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน	51
2.7ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน	52
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	56
3.1เครื่องมือและอุปกรณ์.....	56
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมและเก็บรักษาตัวอย่างเศษอาหาร	56
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมและเก็บรักษาตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร.....	56
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน	56
3.2สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา.....	57
3.2.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์วัสดุตั้งต้น.....	57
3.2.2 สารเคมีสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.....	57
3.3วัสดุตั้งต้นและการเตรียมตัวอย่าง.....	58
3.3.1 เศษอาหาร	58
3.3.2 ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร.....	62
3.4หัวเชื้อจุลินทรีย์	62
3.5การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของวัสดุตั้งต้น	63
3.6การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร.....	64
3.7การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์	65
3.8การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร.....	65
3.8.1 การทดลองชุดที่ 1: อัตราส่วนวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน.....	66
3.8.2 การทดลองชุดที่ 2: อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน..	66
3.8.3 การตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขวดหมักของทั้ง 2 ชุดการทดลอง	67

3.9การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก	69
3.10จลนพลศาสตร์ของการหมักร่วม	70
3.11การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	71
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา.....	72
4.1ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	72
4.2ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุ อาหาร.....	75
4.2.1 การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก... ..	75
4.2.2 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน	86
4.2.3 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม	91
4.2.4 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและ ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร.....	98
4.3อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกันต่อผลผลิตก๊าซ มีเทน	106
4.3.1 การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก. .	106
4.3.2 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน	116
4.3.3 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม	121
4.3.4 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้ง ต้น	126
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	133
5.1สรุปผลการศึกษา.....	133
5.1.1 ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์	133
5.1.2 การผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุ อาหาร.....	134
5.2ข้อเสนอแนะ.....	137
รายการอ้างอิง	138
ภาคผนวก.....	157
ภาคผนวก ก รายละเอียดการเตรียมเศษอาหารแบบแห้งก่อนนำไปใช้ในการทดลอง.....	158
ภาคผนวก ข รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหาร ..	161
ภาคผนวก ค รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ ของผลิตภัณฑ์เชื้อ ชีวภาพบรรจุอาหาร.....	182

ภาคผนวก ง รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหาร	201
ภาคผนวก จ รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ ของผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพ บรรจุอาหาร	211
ภาคผนวก ฉ รายละเอียดการเตรียม/บ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น และการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง.....	221
ภาคผนวก ช รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัว เชื้อจุลินทรีย์	226
ภาคผนวก ซ รายละเอียดสารเคมีและการเตรียมสารเคมีสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซ มีเทน.....	231
ภาคผนวก ฌ รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุม กระบวนการ ย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ	233
ภาคผนวก ฎ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการ ของเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร	249
ภาคผนวก ฏ ข้อมูลผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ของอัตราส่วน FW/CFPP แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	252
ภาคผนวก ฐ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	258
ภาคผนวก ฑ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	265
ภาคผนวก ฒ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	270
ภาคผนวก ด ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	275
ภาคผนวก ฒ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	282
ภาคผนวก ต ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	287
ภาคผนวก ถ ข้อมูลผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ของอัตราส่วน I/S แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต	292
ภาคผนวก ฑ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน I/S ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	298

ภาคผนวก ท ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน I/S ที่สภาวะมาตรฐาน แบบเต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	307
ภาคผนวก ฐ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน I/S ที่สภาวะมาตรฐาน แบบเต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	312
ภาคผนวก น ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน I/S ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	317
ภาคผนวก บ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน I/S ที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	326
ภาคผนวก ป ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม ของอัตราส่วน I/S ที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	331
ภาคผนวก ผ ลักษณะผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารหลังกระบวนการย่อยสลาย (FW/CFPP)	336
ภาคผนวก ฝ ลักษณะผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารหลังกระบวนการย่อยสลาย (I/S).....	338
ภาคผนวก พ การเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ	340
ประวัติผู้เขียน	345



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ.....	29
ตารางที่ 2.2 ระดับความเข้มข้นของไอออนบวกบางชนิดที่สามารถกระตุ้นและยับยั้งกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	37
ตารางที่ 2.3 ผลของแอมโมเนีย (ปริมาณแอมโมเนียในไอออนและแอมโมเนียอิสระ) ต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	38
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ.....	42
ตารางที่ 2.5 สัดส่วนของก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของสารอินทรีย์ตั้งต้นชนิดต่าง ๆ.....	43
ตารางที่ 2.6 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของพืชพลังงานชนิดต่าง ๆ.....	47
ตารางที่ 2.7 ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายโดยใช้การหมักร่วมระหว่างสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ.....	49
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเศษอาหารที่คัดแยกจากขยะมูลฝอยส่วนที่เป็นอินทรีย์สารของสหราชอาณาจักร ฟินแลนด์ โปรตุเกส และอิตาลี.....	59
ตารางที่ 3.2 สูตรเศษอาหารสังเคราะห์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	60
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบและสัดส่วนของเศษอาหารสังเคราะห์และสูตรเศษอาหารสังเคราะห์สำหรับการทดลอง.....	60
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร.....	63
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร.....	64
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	65
ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจติดตามในเฟสของเหลว.....	69

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	74
ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	77
ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)	79
ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	80
ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)	82
ตารางที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	84
ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอทีละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	85
ตารางที่ 4.8 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	89
ตารางที่ 4.9 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	90
ตารางที่ 4.10 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	96
ตารางที่ 4.11 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	97
ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้โมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	99
ตารางที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	107
ตารางที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)	109

ตารางที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)	111
ตารางที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)	113
ตารางที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)	114
ตารางที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีไอดีละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	115
ตารางที่ 4.19 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	119
ตารางที่ 4.20 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	120
ตารางที่ 4.21 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	124
ตารางที่ 4.22 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	125
ตารางที่ 4.23 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้โมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	127
ตารางที่ ฉ.1 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์	223
ตารางที่ ญ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร	250
ตารางที่ ญ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร	251
ตารางที่ ฎ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)	253
ตารางที่ ฎ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	254

ตารางที่ ฎ.3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่าง แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	255
ตารางที่ ฎ.4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	256
ตารางที่ ฎ.5 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอติละลาย แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	257
ตารางที่ ฎ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำขี้เเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุมและชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	259
ตารางที่ ฎ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำขี้เเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	261
ตารางที่ ฎ.3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำขี้เเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	263
ตารางที่ ฐ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำขี้เเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	266
ตารางที่ ฐ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำขี้เเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	268
ตารางที่ ท.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตกำขี้เเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	271
ตารางที่ ท.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตกำขี้เเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	273
ตารางที่ ฅ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำขี้เเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุมและชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1).....	276
ตารางที่ ฅ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำขี้เเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1)	278

ตารางที่ ผ.3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1)	280
ตารางที่ ณ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1).....	283
ตารางที่ ณ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1).....	285
ตารางที่ ด.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1).....	288
ตารางที่ ด.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1).....	290
ตารางที่ ต.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การ ทดลองชุดที่ 2)	293
ตารางที่ ต.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย แบบเติม โซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	294
ตารางที่ ต.3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นด่าง แบบเติมโซเดียมไบ คาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	295
ตารางที่ ต.4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด แบบ เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	296
ตารางที่ ต.5 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลาย แบบเติมโซเดียมไบ คาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	297
ตารางที่ ถ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุมแต่ละชุดที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	299
ตารางที่ ถ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	301
ตารางที่ ถ.3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	303

ตารางที่ ผ.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารตลอดระยะเวลาการหมักแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1) 337

ตารางที่ ผ.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารตลอดระยะเวลาการหมักแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) 339



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 จำนวนบทความที่ตีพิมพ์โดยมีคำว่า “Anaerobic co-digestion” ปรากฏอยู่ในชื่อเรื่อง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 – 2561.....	3
ภาพที่ 2.1 วิธีการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ	10
ภาพที่ 2.2 อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	19
ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศและอุณหภูมิ	19
ภาพที่ 2.4 สัดส่วนปริมาณสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนต ไอออนในน้ำ ที่พีเอชระดับต่าง ๆ.....	23
ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ความแตกต่างในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและปริมาณก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	25
ภาพที่ 2.6 สัดส่วนปริมาณสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไบซัลไฟด์ไอออนและซัลไฟด์ไอออน ที่พี เอชระดับต่าง ๆ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	40
ภาพที่ 3.1 ลักษณะของเศษอาหารสังเคราะห์	61
ภาพที่ 3.2 ลักษณะตัวอย่างเศษอาหารสังเคราะห์ที่ผ่านการแช่แข็ง	61
ภาพที่ 3.3 ลักษณะของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร	62
ภาพที่ 3.4 ลักษณะเม็دتะกอนจุลินทรีย์	63
ภาพที่ 3.5 ขวดหมักที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน	67
ภาพที่ 3.6 การวัดปริมาณก๊าซมีเทนจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมัก.....	68
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การ ทดลองชุดที่ 1).....	76
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบ คาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	78
ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบ คาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	80

ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	82
ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	83
ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	85
ภาพที่ 4.7 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ที่สภาวะมาตรฐาน (ก) เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	88
ภาพที่ 4.8 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ที่สภาวะมาตรฐาน (ก) เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	95
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1).....	100
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)	103
ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	107
ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)	109
ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)	111
ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)	112
ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	113

ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอติละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	115
ภาพที่ 4.17 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันของการหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน (ก) เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	118
ภาพที่ 4.18 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของการหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน (ก) เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต.....	123
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2).....	127
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)	130
ภาพที่ ก.1 ลักษณะของเศษอาหารสังเคราะห์.....	160
ภาพที่ ก.2 ลักษณะเศษอาหารแบบแห้ง.....	160
ภาพที่ ฉ.1 การพ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999	223
ภาพที่ ฉ.2 การล้างตะกอนจุลินทรีย์.....	224
ภาพที่ ฉ.3 ชุดถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับหมักหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น.....	225
ภาพที่ ฉ.4 ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์หลังการกรอง.....	225
ภาพที่ ฉ.1 การกรองของผสมภายในขวดหมักผ่านตะแกรงพลาสติก	235
ภาพที่ ฉ.2 ลักษณะของเหลวใสที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงและชุดกรองสุญญากาศสำหรับกรองน้ำตัวอย่าง.....	235
ภาพที่ พ.1 การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้แสดงปาฐกถา	342
ภาพที่ พ.2 การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์.....	343
ภาพที่ พ.3 การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้นำเสนอผลงานแบบบรรยาย	344

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความเจริญก้าวหน้าและการพัฒนาทางเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตของมนุษย์ นอกจากทำให้ความต้องการด้านพลังงานมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องแล้วยังส่งผลให้แหล่งพลังงานดั้งเดิมอันได้แก่เชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องตามไปด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของโลก พบว่า โลกมีปริมาณการใช้พลังงานต่อปีอยู่ที่ประมาณ 5.80×10^{20} จูล คิดเป็นสัดส่วนเทียบเท่ากับการใช้น้ำมันดิบถึง 13,865 ล้านตัน และตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 เป็นต้นมา การใช้พลังงานของโลกได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2561 โลกมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 2.9 และหากสถานการณ์การใช้พลังงานของโลกยังคงดำเนินต่อไปตามปกติเช่นนี้ ก็คาดการณ์ได้ว่า ปริมาณการใช้พลังงานของโลกจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 7.40×10^{20} จูล ภายในปี พ.ศ. 2583 ซึ่งคิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30 ภายในระยะเวลา 22 ปี (TheWorldCounts, 2022) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ในอนาคตโลกอาจประสบกับภาวะการขาดแคลนพลังงานหากยังคงพึ่งพาแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดไปเพียงแหล่งเดียว ด้วยเหตุนี้ การเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ จึงกลายเป็นความท้าทายสำคัญของสังคมโลกยุคปัจจุบัน และนอกเหนือจากปัญหาความต้องการพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการร่อยหรอของเชื้อเพลิงฟอสซิล ยังมีอีกหนึ่งปัญหาซึ่งเป็นผลมาจากกระแสแห่งความเจริญก้าวหน้าและการพัฒนาทางเทคโนโลยีด้วย นั่นก็คือ ภาวะโลกร้อน ซึ่งส่งผลให้ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการควบคุมและลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อลดวิกฤตจากภาวะโลกร้อนด้วยเช่นกัน จากประเด็นปัญหาต่าง ๆ ที่กล่าวมา ซึ่งมีความเชื่อมโยงถึงกัน จึงส่งผลให้เกิดการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทนอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้ก็เพื่อสร้างความมั่นคงทางพลังงาน และลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งในที่สุดจะสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้

พลังงานชีวภาพ (Bioenergy) จัดเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่ง ที่มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้และการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่วัตถุดิบชีวมวล จึงทำให้แหล่งพลังงานจากชีวมวลกลายเป็นแหล่งพลังงานทดแทนประเภททรัพยากรพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy resources) ที่สำคัญชนิดหนึ่งสำหรับอนาคต ทั้งนี้ในการจัดการกับวัตถุดิบชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานชีวภาพนั้น ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ รวมถึงได้รับการคาดการณ์ว่าจะเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในอนาคตเพื่อใช้ในการผลิตพลังงาน นั่นคือ เทคโนโลยีการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion, AD) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) กระบวนการนี้จัดเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและมีความอ่อนไหวสูง เนื่องจาก

เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีความต้องการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแตกต่างกันในการดำเนินกิจกรรมการย่อยสลาย นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับชนิดและโครงสร้างของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นวัสดุตั้งต้น (Substrate) ในกระบวนการ ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่มักประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งเมื่อเกิดการย่อยสลายในสภาพแวดล้อมที่ปราศจากออกซิเจนก็จะกลายเป็นก๊าซชีวภาพโดยผ่านขั้นตอนเหล่านี้ ได้แก่ การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis stage) การสร้างกรด (Acidogenesis stage) การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis stage) และการสร้างมีเทน (Methanogenesis stage) สำหรับประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของสารอินทรีย์แต่ละชนิดนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์นั้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) ของสารแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ชนิดนั้น ๆ ด้วย (Amon et al., 2007) รวมถึงหากมีการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ เช่น ระดับความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของวัสดุตั้งต้น องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น ขนาดของวัสดุตั้งต้น และปริมาณของสารต่างที่เติมลงในระบบ เป็นต้น ก็สามารถช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นได้อีกเช่นกัน (Sahito & Brohi, 2014)

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการนำกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ชีวมวลประเภทต่าง ๆ เพียงชนิดเดียว (Mono-substrate) เป็นวัสดุตั้งต้น (Sahito & Brohi, 2014) และพบว่า การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวนั้นมักส่งผลให้ปัจจัยซึ่งมีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ เช่น พีเอช (pH) ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio) สารอาหาร (Nutrients) และสารที่เป็นพิษ (Toxic materials) เป็นต้น อยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุลหรือไม่เหมาะสมต่อการทำงานของระบบ จึงส่งผลให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง รวมถึงทำให้ระบบการย่อยสลายล้มเหลวได้ (Khalid et al., 2011; Li et al., 2011; Matheri et al., 2018)

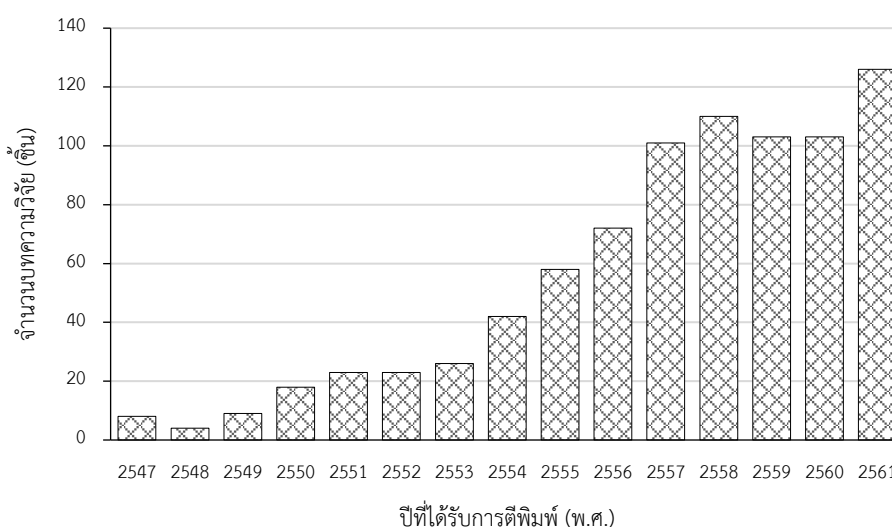
ด้วยเหตุนี้ จึงเริ่มมีการใช้กระบวนการหมักร่วม (Co-digestion process) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ตัวอย่างเช่น มีการใช้ของผสมระหว่างมูลสัตว์และผลพลอยได้ทางการเกษตรเป็นวัสดุตั้งต้น (Mata-Alvarez et al., 2000) ซึ่งต่อมาได้ทำให้มีการนำกระบวนการหมักร่วมภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic co-digestion, AcoD) ไปใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมจัดเป็นกระบวนการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และเป็นกระบวนการที่มีแนวโน้มที่สามารถจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งมีการใช้ชีวมวลเพียง

ชนิดเดียวเป็นวัสดุตั้งต้นได้ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากก่อให้เกิดการผลิตก๊าซมีเทนในปริมาณมากขึ้น (Hagos et al., 2017)

ปัจจุบัน กระบวนการหมักร่วมภายใต้สภาวะไร้อากาศ ได้กลายเป็นประเด็นการวิจัยที่สำคัญ ประเด็นหนึ่งในงานวิจัยด้านเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยภายในระยะเวลา 15 ปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนากระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 1.1) (Yang et al., 2019) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีการหมักร่วมภายใต้สภาวะไร้อากาศไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อจัดการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม การปลดปล่อยมลพิษ และภาวะโลกร้อนที่กำลังเกิดขึ้นอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงเพื่อตอบสนองความต้องการด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นในอนาคตได้อย่างมีความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

ภาพที่ 1.1

จำนวนบทความที่ตีพิมพ์โดยมีคำว่า “Anaerobic co-digestion” ปรากฏอยู่ในชื่อเรื่อง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 – 2561



หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters,” โดย Q. Yang, B. Wu, F. Yao, L. He, F. Chen, Y. Ma, X. Shu, K. Hou, D. Wang, and X. Li, 2019, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(4), หน้า 772. ปีลิขสิทธิ์ 2018 โดย Springer Nature.

ด้วยเหตุและผลดังที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงให้ความสนใจในการศึกษาถึงการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารซึ่งจัดเป็นองค์ประกอบหลักของขยะมูลฝอยชุมชนโดยนำมาหมักร่วมกับผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารซึ่งในปัจจุบันจัดเป็นขยะมูลฝอยอีกประเภทหนึ่งที่จะมีปริมาณมากขึ้นในอนาคต เนื่องจากได้รับการรณรงค์ให้นำมาใช้แทนบรรจุภัณฑ์พลาสติกประเภทต่าง ๆ และจากการสืบค้นข้อมูลรายงานการศึกษาต่าง ๆ ก็ไม่พบว่ามีกรณีพิมพ์รายงานการศึกษาเกี่ยวกับการหมักร่วมด้วยวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว ดังนั้นการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและบรรจุภัณฑ์เยื่อชีวภาพจึงน่าจะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการหลีกเลี่ยงปัญหาสิ่งแวดล้อมในอนาคตที่ยั่งยืนและยังสามารถก่อให้เกิดผลพลอยได้เป็นพลังงานหมุนเวียนอีกทางหนึ่ง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical methane potential, BMP) โดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (วัสดุตั้งต้น) โดยครอบคลุมประเด็นการศึกษาหลัก 3 ประเด็น ซึ่งแต่ละประเด็นการศึกษามีรายละเอียดและวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1) การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารและการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1.1) เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ของแข็งคงตัว (Fixed solids, FS) อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon, OC) ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (Total nitrogen, TKN) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, TP) ซีไอดี (Chemical oxygen demand, COD) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio)

1.2) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose, CEL) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose, HEM) และลิกนิน (Lignin, LIG)

2) การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ส่งผลให้ระบบการย่อยสลายเพื่อการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในสภาวะสมดุลและมีประสิทธิภาพดี มีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

2.1) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน

2.2) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช (pH) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs) ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk) อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง (Volatile fatty acids to alkalinity ratio, VFAs/Alk ratio) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen, TAN) และซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand, SCOD) ระหว่างเกิดกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน

2.3) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน ด้วยสมการ Modified Gompertz

2.4) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ซึ่งส่งผลให้ระบบการย่อยสลายเพื่อการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในสภาวะสมดุลและมีประสิทธิภาพดี

3) การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการศึกษาในหัวข้อที่ 2.4) ต่อผลผลิตก๊าซมีเทน มีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

3.1) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสม (วัสดุตั้งต้น) โดยมีการใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน

3.2) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช กรดไขมันระเหยง่าย ความเป็นด่าง อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด และซีโอดีละลาย ระหว่างเกิดกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสม (วัสดุตั้งต้น) โดยมีการใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน

3.3) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์

เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสม (วัสดุตั้งต้น) โดยมีการใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน ด้วยสมการ Modified Gompertz

1.3 สมมติฐานการศึกษา

การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยใช้การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร จะช่วยส่งเสริมให้การผลิตก๊าซมีเทนมีศักยภาพสูงขึ้น รวมทั้งทำให้ระบบการย่อยสลายมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพดีกว่า กล่าวคือ มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่า รวมถึงให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งใช้วัสดุตั้งต้น (เศษอาหาร หรือ ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร) เพียงชนิดเดียว นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน รวมถึงอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้ผลผลิตก๊าซมีเทนมีความแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (วัสดุตั้งต้น) ที่ระดับอุณหภูมิปานกลาง (35 ± 2 องศาเซลเซียส) และดำเนินการทดลองเป็นแบบแบตช์ (Batch experiment) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ซึ่งแต่ละชุดการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1) การทดลองชุดที่ 1

ชุดการทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ส่งผลให้ระบบการย่อยสลายเพื่อการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในสภาวะสมดุลและมีประสิทธิภาพดี โดยทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) ทั้งนี้มีการใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 2:1 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย)

2) การทดลองชุดที่ 2

ชุดการทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกันต่อผลผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งการทดลองชุดที่ 2 ได้เริ่มดำเนินการทดลองเมื่อการทดลองชุดที่ 1 ดำเนินการเสร็จเรียบร้อยแล้ว และทราบว่าอัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารอัตราส่วนใดมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทน หลังจากนั้นใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุตั้งต้น 2 ชนิดดังกล่าวมาดำเนินการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่าง กันต่อ

ผลผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งอัตราส่วนของหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย)

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) ทราบถึงผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (วัสดุตั้งต้น) ที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน

2) ทราบถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช กรดไขมันระเหยง่าย ความเป็นด่าง อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด และซีโอดีละลาย ระหว่างเกิดกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน

3) ทราบถึงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน

4) ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (วัสดุตั้งต้น) ที่ช่วยส่งเสริมให้กระบวนการย่อยสลายเพื่อการผลิตก๊าซมีเทน อยู่ในสภาวะสมดุลและมีประสิทธิภาพดี

5) ทราบถึงอิทธิพลของการใช้อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช กรดไขมันระเหยง่าย ความเป็นด่าง อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด และซีโอดีละลาย ระหว่างเกิดกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสม (วัสดุตั้งต้น)

6) ทราบถึงอิทธิพลของการใช้อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน ที่ส่งผลต่อผลผลิตก๊าซมีเทนซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสม (วัสดุตั้งต้น)

7) ทราบถึงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (วัสดุตั้งต้น) ที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่

เหมาะสม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการใช้อัตราส่วนของหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน

8) ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาและส่งเสริมการใช้ประโยชน์ของเสียประเภทเศษอาหารซึ่งในปัจจุบันมักถูกทิ้งร่วมกับผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ย่อยสลายได้ โดยนำมาบำบัดด้วยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ ส่งผลให้เกิดการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ลงได้อีกทางหนึ่ง



บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสาร

2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน และส่งผลให้เกิดก๊าซผสมที่เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) โดยพบเกิดขึ้นในลำน้ำ ตะกอนท้องน้ำ และดินชุ่มน้ำ นอกจากนี้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการหมักของเสียชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำเสียอุตสาหกรรม น้ำเสียชุมชน วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร มูลฝอยชุมชน เศษอาหาร และเศษพืชผักผลไม้ เป็นต้น

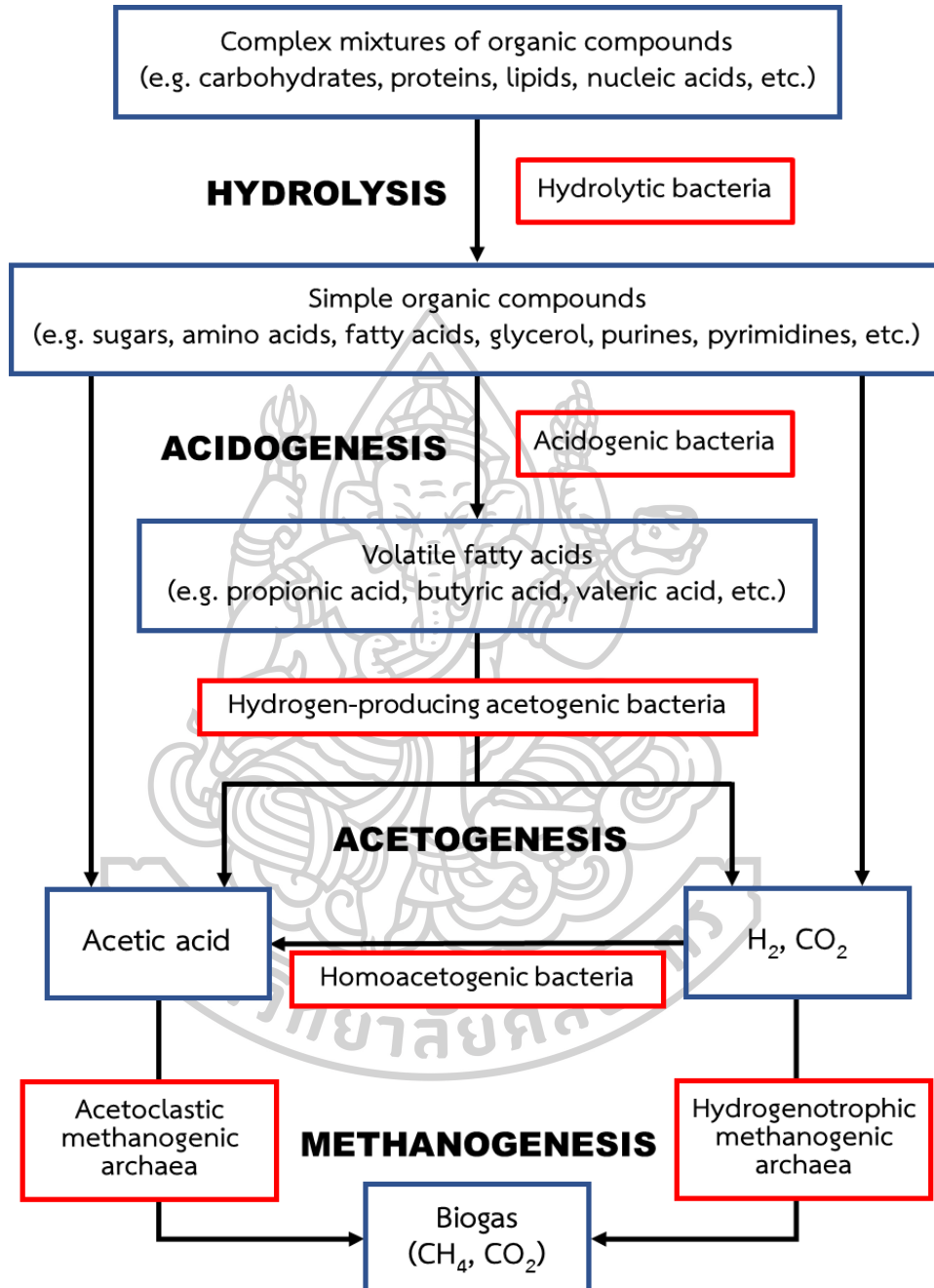
ทั้งนี้ การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่มีหลายขั้นตอน และต้องอาศัยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศหรือไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic microorganisms) โดยในระหว่างกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจนนั้น สารอินทรีย์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) และวัสดุคั่งเหลือที่ย่อยสลายแล้ว (Digestate) กระบวนการดังกล่าวมีขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง 4 ขั้นตอน ได้แก่ การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การสร้างกรด (Acidogenesis) การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) และการสร้างมีเทน (Methanogenesis) โดยขั้นตอนต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 2.1 และมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 การไฮโดรไลซิส

ในทางเคมี ไฮโดรไลซิส คือ กระบวนการที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะเคมีของวัสดุตั้งต้น โดยโมเลกุลของน้ำจะแตกตัวออก และเข้าไปแยกสลายสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก การไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศและเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากวัสดุตั้งต้นมีสถานะเป็นของแข็ง (Anukam et al., 2019) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่หรือเป็นพอลิเมอร์จะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด (Acidogenic bacteria หรือ Fermentative bacteria) ทั้งนี้การไฮโดรไลซิสจะช่วยให้สารอินทรีย์ตั้งต้นเกิดการย่อยสลายได้ง่ายขึ้นในขั้นตอนต่อไป (Kangle et al., 2011)

ภาพที่ 2.1

วิธีการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ



หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Diversity-Function Relationships in Natural, Applied, and Engineered Microbial Ecosystems,” โดย A. Free, M. A. McDonald, and E. Pagaling, ,2018, *Advances in Applied Microbiology*, 105, น. 17. ปีลิขสิทธิ์ 2018 โดย Elsevier Science.

ขั้นตอนการไฮโดรไลซิส ต้องอาศัยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซิส (Hydrolytic bacteria) เช่น *Clostridia*, *Micrococci*, *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Fusobacterium*, *Selenomonas* และ *Streptococcus* เป็นต้น ซึ่งดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน อีสระ (Facultative anaerobic bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ผลิตเอนไซม์ที่หลั่งออกมานอกเซลล์ (Exoenzymes) เพื่อให้สารอินทรีย์เชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำเกิดการไฮโดรไลซิส ส่งผลให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงและอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ เช่น น้ำตาล (Sugars) กรดอะมิโน (Amino acids) และกรดไขมัน (Fatty acids) เป็นต้น โดยเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulases) และเอนไซม์ไซลานเนส (Xylanases) ซึ่งหลั่งออกมาจากแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลส (Cellulolytic bacteria) และแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายไซโลส (Xylanolytic bacteria) ทำหน้าที่เปลี่ยนเซลลูโลส (Cellulose) และไซโลส (Xylose) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) ให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส (Glucose) และน้ำตาลไซเลม (Xylem) ตามลำดับ สำหรับเอนไซม์โปรติเอส (Proteases) ซึ่งหลั่งออกมาจากแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายโปรตีน (Proteolytic bacteria) ทำหน้าที่เปลี่ยนโปรตีน (Proteins) เป็นกรดอะมิโน ส่วนเอนไซม์ไลเปส (Lipases) ซึ่งหลั่งออกมาจากแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายไขมัน (Lipolytic bacteria) ทำหน้าที่เปลี่ยนไขมัน (Lipids) เป็นกรดไขมัน (Fatty acids) และกลีเซอรอล (Glycerol) (Kangle et al., 2011; Merlin et al., 2014) ทั้งนี้สามารถสรุปลักษณะของปฏิกิริยาอย่างง่ายในการไฮโดรไลซิสสารอินทรีย์บางชนิดได้ดังสมการที่ 1 – สมการที่ 4 (Kangle et al., 2011)



สำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ การไฮโดรไลซิสอาจเป็นขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน หากมีสารพิษหรือสารประกอบที่ไม่พึงประสงค์เกิดขึ้นในกระบวนการ (Ariunbaatar, Panico, Esposito, et al., 2014) และหากวัสดุตั้งต้นมีสถานะเป็นของแข็งก็จะทำให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศใช้ระยะเวลานานมากขึ้น (Bouallagui et al., 2005) ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซิสจึงช่วยให้ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายดีขึ้นได้ ซึ่งการปรับสภาพ (Pretreatment) วัสดุอินทรีย์ตั้งต้นด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ หรือวิธีผสมผสานของหลาย ๆ วิธีดังกล่าวเข้าด้วยกัน จัดเป็นวิธีที่มีการ

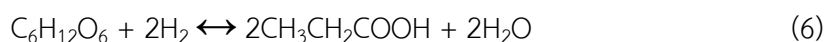
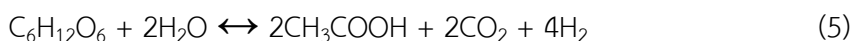
นำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการไฮโดรไลซิสให้ดีขึ้น ทั้งนี้เพราะการปรับสภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังกล่าว มักช่วยให้วัสดุอินทรีย์ตั้งต้นเกิดการแตกสลายหรือมีขนาดเล็กกลง ส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซิสสามารถเข้าทำลายได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศลงได้ (Ferrer et al., 2008)

2.1.2 การสร้างกรด

การสร้างกรด (Acidogenesis) หรือ การหมัก (Fermentation) อาศัยการทำงานของแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ รวมทั้งอาศัยแบคทีเรียที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เฉพาะภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligate anaerobic bacteria) โดยเรียกแบคทีเรียกลุ่มเหล่านี้ว่า แบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด (Acidogenic bacteria หรือ Fermentative bacteria) ตัวอย่างเช่น *Micrococcus*, *Peptococcus*, *Streptococcus*, *Desulfomonas*, *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Escherichia coli* และ *Salmonella* เป็นต้น (Bajpai, 2017)

ในขั้นตอนนี้ สารประกอบรูปที่ละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นผลผลิตจากขั้นตอนการไฮโดรไลซิส เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน เป็นต้น จะแพร่เข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด และถูกนำไปใช้ในการสร้างกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs) ชนิดต่าง ๆ ตลอดจนสร้างสารประกอบอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แอลกอฮอล์ (Alcohols) คีโตน (Ketones) แอมโมเนีย (NH_3) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น สำหรับกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นมักประกอบด้วยกรดอินทรีย์ (Organic acids) เหล่านี้ ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดพรอปิโอนิก (Propionic acid) และกรดบิวทีริก (Butyric acid) โดยพบมีอัตราส่วนอยู่ระหว่าง 75:15:10 – 40:40:20 (Bergman, 1990) นอกจากนี้อาจพบกรดแลคติก (Lactic acid) ได้ในปริมาณเล็กน้อย (Van Lier et al., 2008)

ในที่นี้ได้ยกตัวอย่างปฏิกิริยาการหมักกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) ซึ่งก่อให้เกิดกรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดพรอปิโอนิก (CH_3CH_2COOH) และเอทานอล (CH_3CH_2OH) ดังแสดงในสมการที่ 5 – สมการที่ 7 ตามลำดับ (Kangle et al., 2011)



เมื่อระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศอยู่ในภาวะสมดุล สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเกิดการย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในทันทีโดยจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน แต่สารอินทรีย์อีกส่วนหนึ่งกล่าวคือ ประมาณร้อยละ 30 จะเกิดการย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (เช่น กรดพรอพิโอนิก และกรดบิวทีริก) และแอลกอฮอล์ ส่วนการหมักของกรดอะมิโน โดยทั่วไปมักก่อให้เกิดแอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจัดเป็นสารประกอบที่เป็นผลพลอยได้ของกระบวนการที่สามารถก่อให้เกิดการยับยั้งกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศได้ (Kangle et al., 2011)

เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่น ๆ การสร้างกรดจัดเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่าขั้นตอนอื่น เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดเป็นแบคทีเรียที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 36 ชั่วโมง (Deublein & Steinhauser, 2008) และด้วยเหตุที่เป็นขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไปเป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ จึงทำให้ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีค่าพีเอชลดต่ำลง โดยอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดเล็กน้อย (พีเอชอยู่ระหว่าง 5.5 – 6.5) ซึ่งเป็นระดับของค่าพีเอชที่ช่วยส่งเสริมให้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดอะซิติกทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Nathia-Neves et al., 2018)

2.1.3 การสร้างกรดอะซิติก

การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนรูปของสารประกอบบางชนิดที่เกิดขึ้นจากการหมัก เช่น กรดไขมันระเหยง่ายชนิดที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป แอลกอฮอล์ และกรดไขมันชนิดอะโรมาติก เป็นต้น ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติกซึ่งสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (Hydrogen-producing acetogenic bacteria) (Schink, 1997) ทั้งนี้แบคทีเรียที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการสร้างกรดอะซิติกมีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น *Syntrophobacter wolinii* และ *Methanobacterium propionicum* ทำหน้าที่ในการย่อยสลายกรดพรอพิโอนิก และ *Syntrophomonas wolfei* ทำหน้าที่ในการย่อยสลายกรดบิวทีริก นอกจากนี้กรดอะซิติกยังถูกสร้างโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างเฉพาะกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว (Homoacetogenic bacteria) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติกจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Sterling et al., 2001) อย่างไรก็ตาม กรดอะซิติกส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ มักถูกสร้างโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติกซึ่งสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เป็นหลัก (Kangle et al., 2011)

สำหรับไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศจัดเป็นของเสียสำหรับขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติก เนื่องจากไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในระบบจะส่งผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติก ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนทิ้งไป

ด้วยเหตุนี้จึงมีการเรียกขั้นตอนนี้ได้อีกอย่างหนึ่งว่า ขั้นตอนการกำจัดไฮโดรเจน (Dehydrogenation stage) ทั้งนี้ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน จึงมีการเรียกจุลินทรีย์กลุ่มนี้ว่า จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่กำจัดไฮโดรเจน (Hydrogen-scavenging microorganisms) โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฮโดรเจนให้กลายเป็นมีเทน (Anukam et al., 2019) จึงส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกันขึ้น (Symbiosis) ระหว่างแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติกและจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน เพื่อกำจัดไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในระบบ (Zehra et al., 2019)

สำหรับตัวอย่างของปฏิกิริยาการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างกรดอะซิติกแสดงดังสมการที่ 8 – สมการที่ 11 (Anukam et al., 2019; Neshat et al., 2017)



เมื่อพิจารณาสมการที่ 8 – สมการที่ 10 จะเห็นว่า มีลักษณะปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ และแสดงให้เห็นว่า มีการเกิดขึ้นของไฮโดรเจน โดยสมการที่ 8 แสดงให้เห็นว่า สารประกอบที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการสร้างกรดได้ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก (CH_3COOH) และไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งจะถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ในขั้นตอนต่อไปของการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

การสร้างกรดอะซิติกจัดเป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ด้วยเหตุที่เป็นขั้นตอนซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากก๊าซมีเทนจะถูกสร้างขึ้นผ่านปฏิกิริยารีดักชันของกรดอะซิติกเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 70 ดังนั้นกรดอะซิติกจึงจัดเป็นสารประกอบตัวกลางที่มีความสำคัญมากสำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Zehra et al., 2019)

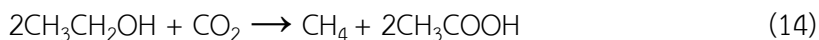
2.1.4 การสร้างมีเทน

การสร้างมีเทน (Methanogenesis) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (Methanogenic microorganisms) จะย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติกให้กลายเป็นมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทั้งนี้จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนเป็นอาร์เคียที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เฉพาะภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligate

anaerobic archaea) อาร์เคียกลุ่มนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตค่อนข้างช้าและมีความอ่อนไหวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม สำหรับกลุ่มอาร์เคียซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนที่พบมีการรายงานไว้ เช่น *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanothermus*, *Methanomicrobium*, *Methanogenium*, *Methanospirillum*, *Methanococcoides*, *Methanococcus*, และ *Methanosarcina* เป็นต้น (Bitton, 2005)

การสร้างมีเทนโดยส่วนใหญ่ มักเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบตั้งต้นหลัก 6 ชนิดเหล่านี้ ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) กรดเมทาโนอิก (Methanoic acid, HCOOH) เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เมทิลเอมีน (Methylamines, CH_3NH_2) และไดเมทิลซัลไฟด์ (Dimethyl sulfides, $(\text{CH}_3)_2\text{S}$) ผ่านวิถีการสร้างมีเทนวิถีใดวิถีหนึ่งใน 3 วิถีต่อไปนี้ ได้แก่ (1) การสร้างมีเทนโดยอาร์เคียที่ใช้กรดอะซิติกเป็นอาหาร (Acetoclastic or Acetotrophic methanogenesis) (2) การสร้างมีเทนโดยอาร์เคียที่ชอบหรือใช้ไฮโดรเจนเป็นอาหาร (Hydrogenophilic or Hydrogenotrophic methanogenesis) และ (3) การสร้างมีเทนโดยอาร์เคียที่ใช้สารประกอบกลุ่มเมทิลเป็นอาหาร (Methylotrophic methanogenesis) อย่างไรก็ตาม การสร้างมีเทนในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมักเกิดขึ้นผ่าน 2 วิถีแรกเป็นหลัก ได้แก่ (1) การสร้างมีเทนโดยอาร์เคียที่ใช้กรดอะซิติกเป็นอาหาร วิถีนี้เป็นการสร้างมีเทนจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ของกรดอะซิติก และ (2) การสร้างมีเทนโดยอาร์เคียที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นอาหาร วิถีนี้เป็นการสร้างมีเทนโดยปฏิกิริยารีดักชันระหว่างไฮโดรเจนหรือกรดเมทาโนอิกและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไฮโดรเจนหรือกรดเมทาโนอิกถูกออกซิไดส์และคาร์บอนไดออกไซด์ถูกรีดิวซ์ กลายเป็นมีเทน โดยทั่วไป พบว่า มีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างมีเทนประมาณร้อยละ 70 ถูกผลิตขึ้นจากอาร์เคียกลุ่มที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Acetoclastic methanogenic archaea) ในขณะที่มีเทนอีกประมาณร้อยละ 30 ถูกผลิตขึ้นจากอาร์เคียกลุ่มที่สร้างมีเทนจากไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic methanogenic archaea) ส่วนในวิถีที่ (3) การสร้างมีเทนโดยอาร์เคียที่ใช้สารประกอบกลุ่มเมทิลเป็นอาหาร วิถีนี้เป็นการสร้างมีเทนจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของสารประกอบจำพวกเมทิล เช่น เมทานอล เมทิลเอมีน และไดเมทิลซัลไฟด์ แม้ว่ามีเทนที่เกิดขึ้นจากวิถีนี้จะมียุทธศาสตร์น้อยกว่า 2 วิถีแรก แต่ก็จัดว่าเป็นวิถีการสร้างมีเทนที่สำคัญเช่นกัน (Goswami et al., 2016; Sikora et al., 2017)

สำหรับปฏิกิริยาการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างมีเทนแสดงดังสมการที่ 12 – สมการที่ 14 (Anukam et al., 2019)



สมการที่ 12 แสดงถึงการย่อยสลายกรดอะซิติกให้กลายเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนสมการที่ 13 แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบบิวทรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนกลายเป็นมีเทนและน้ำ และสมการที่ 14 แสดงถึงการสร้างมีเทนโดยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ของเอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)

ขั้นตอนการสร้างมีเทนจัดเป็นขั้นตอนที่มีประสิทธิผลที่แท้จริงในการกำจัดสารมลพิษที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากขั้นตอนต่าง ๆ ก่อนหน้าขั้นตอนการสร้างมีเทนเป็นเพียงขั้นตอนในการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์จากรูปหนึ่งไปสู่อีกรูปหนึ่งเท่านั้น แต่ขั้นตอนการสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนที่ทำให้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) หรืออยู่ในรูปความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical oxygen demand, BOD) มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศในขั้นตอนการสร้างมีเทนนั่นเอง (Bajpai, 2017)

2.2 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนอย่างมากและมีความเกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์หลายชนิดซึ่งต้องทำงานสัมพันธ์กันอย่างสมดุลเพื่อให้ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีความเสถียร ดังนั้นการควบคุมสภาวะแวดล้อมในระบบให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพราะหากสภาวะแวดล้อมในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ก็จะส่งผลกระทบต่อความสมดุลของระบบ โดยจะทำให้ระบบเกิดการสะสมสารประกอบตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะไปยังยับยั้งกระบวนการย่อยสลายภายในระบบ หรืออาจส่งผลให้ระบบการย่อยสลายเกิดความล้มเหลว ทั้งนี้มีหลายปัจจัยซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมในระบบ ตลอดจนส่งผลกระทบต่ออัตราการย่อยสลายและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เช่น อุณหภูมิ (Temperature) พีเอช (pH) ความเป็นด่าง (Alkalinity, Akl) ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (Concentration of VFAs) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR) ระยะเวลาการกักเก็บ (Retention time, RT) ความชื้น (Moisture) สารอาหาร (Nutrients) และสารที่เป็นพิษ (Toxic materials) เป็นต้น ดังนั้นในการควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศให้มีความ

สมดุลเพื่อให้เกิดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงสุด จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงความสำคัญและความสัมพันธ์กันของปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าว เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศให้อยู่ในสภาวะสมดุล สำหรับรายละเอียดของปัจจัยสำคัญบางประการที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีดังนี้

2.2.1 อุณหภูมิ

กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีความอ่อนไหวอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เนื่องจากความผันแปรของอุณหภูมิมิทธิพลสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้น ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ตลอดจนความมีเสถียรภาพของระบบ (Khalid et al., 2011) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซิส ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ รวมถึงส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติก เพราะแบคทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ดังกล่าวไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เช่นกัน ทั้งนี้แบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดอะซิติกจะสามารถดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น หากอุณหภูมิเกิดการเบี่ยงเบนออกไปจากสภาวะที่เหมาะสมก็จะเป็นสาเหตุทำให้ระบบการย่อยสลายมีสภาวะความเป็นกรด ซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ส่วนจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนก็ไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผันแปรไปมากกว่า 1 องศาเซลเซียสต่อวันได้ (Tchobanoglous et al., 2003)

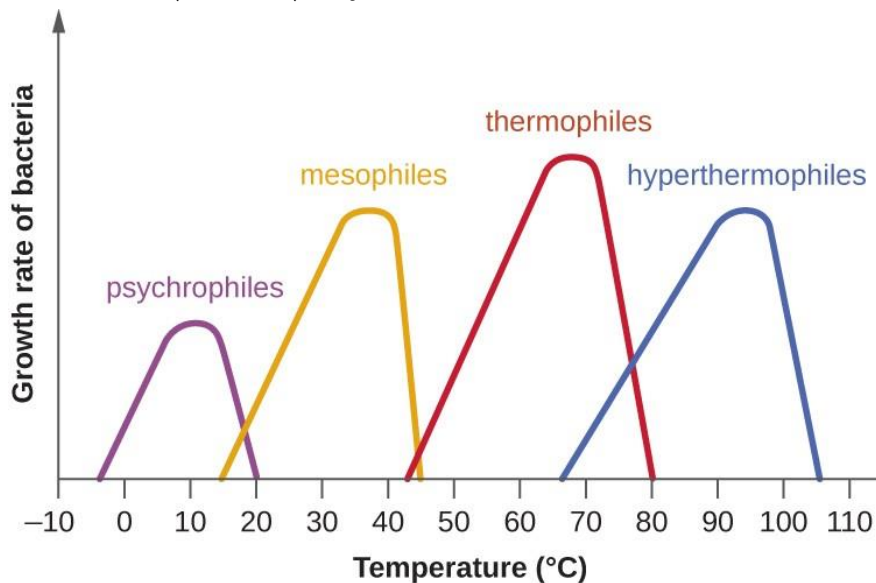
โดยทั่วไป มีการแบ่งช่วงอุณหภูมิสำหรับการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศตามความทนทานต่ออุณหภูมิของกลุ่มจุลินทรีย์ออกเป็น 4 ช่วงอุณหภูมิ (ภาพที่ 2.2) ได้แก่ อุณหภูมิต่ำ (Psychrophilic temperature) อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic temperature) อุณหภูมิสูง (Thermophilic temperature) และอุณหภูมิสูงมาก (Hyperthermophilic temperature) โดยมีช่วงค่าอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 4 – 25 องศาเซลเซียส 30 – 40 องศาเซลเซียส 50 – 60 องศาเซลเซียส และสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Bramstedt, 2016; Schnürer & Jarvis, 2009) ทั้งนี้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกช่วงอุณหภูมิ (ภาพที่ 3) แต่นิยมดำเนินการใน 2 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิปานกลาง และช่วงอุณหภูมิสูง โดยพบจุลินทรีย์มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สำหรับช่วงอุณหภูมิปานกลาง และช่วงอุณหภูมิสูง ตามลำดับ (ภาพที่ 2.3) แม้ว่าการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศสามารถเกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงน้อยกว่า 10 องศาเซลเซียส อัตราการย่อยสลายจะช้าลงถึง 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการย่อยสลายในสภาวะปกติที่อยู่

ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง ทั้งนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาการย่อยสลายทั้งทางเคมีและทางชีวภาพจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนถูกยับยั้งการเจริญเติบโตจากอุณหภูมิที่ลดต่ำลง (Sarker et al., 2019; Trzcinski, 2009) ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิมีระดับเพิ่มสูงขึ้น ดังเช่นในช่วงอุณหภูมิปานกลาง และในช่วงอุณหภูมิสูง กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีแนวโน้มของการมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมมากขึ้นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้อัตราการไฮโดรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น ผลผลิตก๊าซชีวภาพจึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

โดยทั่วไป การดำเนินงานภายใต้ช่วงอุณหภูมิสูงมักทำให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยช่วยส่งเสริมให้เกิดลักษณะต่าง ๆ เช่น สารอินทรีย์เกิดการไฮโดรไลซิสอยู่ในรูปสารประกอบที่ละลายน้ำได้ง่ายมากขึ้น ปฏิกิริยาทางเคมีและทางชีวเคมีเกิดได้เร็วขึ้น ความสามารถในการละลายของก๊าซในของเหลวลดลง ความหนืดของของเหลวลดลง เชื้อโรคถูกทำลายมากขึ้น และกลิ่นเหม็นลดลง เป็นต้น (Neshat et al., 2017) แต่ในอีกทางหนึ่ง อุณหภูมิที่สูงขึ้นกลับส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงต้องมีการเพิ่มการควบคุมกระบวนการย่อยสลายเพื่อให้ของเสียมีความเป็นเนื้อเดียวกันและทำให้อุณหภูมิภายในถังหมักอยู่ในระดับที่คงที่และทั่วถึง นอกจากนี้การย่อยสลายภายใต้ช่วงอุณหภูมิสูงยังทำให้มีแอมโมเนียอิสระสะสมในระบบมากขึ้น รวมทั้งช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาในการสร้างกรด ซึ่งทำให้มีกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงอาจมีผลยับยั้งกระบวนการผลิตการก๊าซชีวภาพได้ (Angelidaki & Ahring, 1994; Mao et al., 2015) อย่างไรก็ตาม มีการรายงานว่าการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิสูงสามารถให้ผลผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าที่อุณหภูมิปานกลาง (Kim et al., 2006; Neshat et al., 2017) แต่ในอีกทางหนึ่ง อุณหภูมิที่สูงขึ้นกลับส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงต้องมีการเพิ่มการควบคุมกระบวนการย่อยสลายเพื่อให้ของเสียมีความเป็นเนื้อเดียวกันและทำให้อุณหภูมิภายในถังหมักอยู่ในระดับที่คงที่และทั่วถึง นอกจากนี้การย่อยสลายภายใต้ช่วงอุณหภูมิสูงยังทำให้มีแอมโมเนียอิสระสะสมในระบบมากขึ้น รวมทั้งช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาในการสร้างกรด ซึ่งทำให้มีกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงอาจมีผลยับยั้งกระบวนการผลิตการก๊าซชีวภาพได้ (Angelidaki & Ahring, 1994; Mao et al., 2015) อย่างไรก็ตาม มีการรายงานว่าการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิสูงสามารถให้ผลผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าที่อุณหภูมิปานกลาง (Kim et al., 2006)

ภาพที่ 2.2

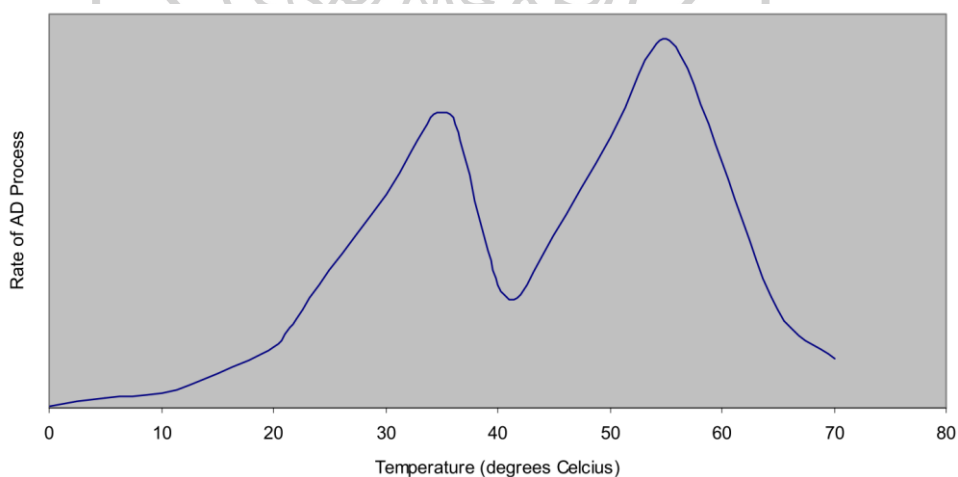
อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก *Microbiology* (น. 9-4), โดย N. Parker, M. Schneegurt, A. H. Thi Tu, P. Lister, and B. M. Forster, 2016, OpenStax. ปีสืบค้น 2016 โดย OpenStax.

ภาพที่ 2.3

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศและอุณหภูมิ



หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก *Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic municipal wastes. (Master of Science Degree)* (น. 21), โดย K. Ostrem, 2004, Columbia University. ปีสืบค้น 2004 โดย Columbia University.

ในปัจจุบัน การดำเนินงานภายใต้ช่วงอุณหภูมิปานกลางกำลังเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น ในการนำไปใช้งานในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากการควบคุมกระบวนการทำได้ง่ายกว่า ใช้พลังงานน้อยกว่า ระบบมีความเสถียรสูงกว่าและมีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานในช่วงอุณหภูมิสูง (Kothari et al., 2014; Náthia-Neves et al., 2018) อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์ที่ดำเนินกิจกรรมในระดับอุณหภูมิปานกลางจะได้รับผลกระทบจากแอมโมเนียที่สะสมอยู่ในระบบมากกว่าจุลินทรีย์ที่ดำเนินกิจกรรมในระดับอุณหภูมิสูง (H. Wang et al., 2016) นอกจากนี้การเปลี่ยนระดับอุณหภูมิในการดำเนินงานจากอุณหภูมิปานกลางไปเป็นอุณหภูมิสูงจะทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพลดลง จนกว่าจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ จะสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ และสามารถเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้อีกครั้งหนึ่ง (Khalid et al., 2011; Ward et al., 2008) นอกจากนี้การเปลี่ยนระดับอุณหภูมิในการดำเนินงานจากอุณหภูมิปานกลางไปเป็นอุณหภูมิสูงจะทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพลดลง จนกว่าจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ จะสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ และสามารถเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้อีกครั้งหนึ่ง (Khalid et al., 2011; Ward et al., 2008)

การศึกษาของ Briški et al. (2007) แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายของสารอินทรีย์ต้องเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิที่สูงกว่าค่าดังกล่าวจะส่งผลให้เอนไซม์สูญเสียสภาพธรรมชาติ Hegde and Pullammanappallil (2007) สังเกตเห็นว่า ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส กรดไขมันมีอัตราการย่อยสลายเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่า การดำเนินงานที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายสั้นกว่าที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาจากปริมาณมีเทน ซึ่งพบว่า ปริมาณมีเทนร้อยละ 95 ของศักยภาพการผลิตมีเทน เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 11 และ 27 วัน ที่อุณหภูมิ 55 และ 38 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Yu et al. (2014) ซึ่งทำการเปรียบเทียบสภาวะการทำงานภายใต้ช่วงอุณหภูมิสูงและช่วงอุณหภูมิปานกลางของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศที่มีอัตราการบรรทุทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตร-วัน พบว่า ช่วงอุณหภูมิ 55 – 57 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 749.69 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ส่วนช่วงอุณหภูมิ 35 – 37 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 628.80 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย แต่เมื่ออัตราการบรรทุทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 8 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตร-วัน กลับพบว่าช่วงอุณหภูมิปานกลางให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 628.00 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งสูงกว่าในช่วงอุณหภูมิสูงซึ่งให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 536.00 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย

2.2.2 พีเอช

โดยทั่วไป จุลินทรีย์แต่ละชนิดมักเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าพีเอชที่มีความจำเพาะแตกต่างกัน ตลอดจนมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดเมื่อค่าพีเอชอยู่ในระดับที่เหมาะสมแตกต่างกัน (Montañés et al., 2014) ดังนั้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อาศัยจุลินทรีย์หลายชนิดซึ่งเป็นกลุ่มที่ไม่ต้องการอากาศหรือไม่ต้องการออกซิเจน จึงมีความต้องการระดับของค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตแตกต่างกัน (Azman et al., 2015) สำหรับแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดมักเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 5.5 – 6.5 ส่วนอาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 7.8 – 8.2 อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งมีลักษณะการอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดมักควบคุมระดับของค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 6.8 – 7.4 โดยมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในระดับเป็นกลาง (Neutral pH) (Bajpai, 2017)

เนื่องจากการสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าที่สุด จึงถือเป็นขั้นตอนที่ทำหน้าที่ควบคุมอัตราเร็ว (Rate limiting step) ของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ดังนั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่ต้องรักษาระดับของค่าพีเอชในระบบให้ใกล้เคียงระดับเป็นกลาง เพราะค่าพีเอชในระดับต่ำจะส่งผลยับยั้งการดำเนินกิจกรรมของอาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน จึงทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและไฮโดรเจนในระบบ ซึ่งเมื่อความดันส่วนของไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น ก็จะไปยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายกรดพอร์ฟิอิก จึงส่งผลให้เกิดการสะสมกรดไขมันระเหยง่ายเป็นปริมาณมากขึ้น เช่น กรดพอร์ฟิอิกและกรดบิวทีริก เป็นต้น ทำให้ค่าพีเอชของระบบยิ่งลดต่ำลง ซึ่งหากไม่ได้รับการแก้ไข ระบบอาจล้มเหลวได้ในที่สุด ทั้งนี้เรียกภาวะการนี้ดังกล่าวว่า ระบบเป็นกรด (Sour) หรือ ระบบเกิดการติดขัด (Stuck) (Bajpai, 2017)

การทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ ถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ทั้งนี้อาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนเป็นจุลินทรีย์ที่มีความอ่อนไหวสูงที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อพีเอชมีค่าอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งหากค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 อาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนจะมีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง และหากค่าพีเอชลดต่ำกว่า 6.0 ระบบการย่อยสลายจะเริ่มประสบกับปัญหายุ่งยากหลายอย่าง แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นสูงกว่า 7.5 อาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนจะยังสามารถเจริญเติบโตได้ แต่อัตราการเมแทบอลิซึมจะลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากสารอาหารสำคัญหรือโลหะปริมาณน้อยเกิดการตกตะกอนเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลยับยั้งกระบวนการเมแทบอลิซึม (Bajpai, 2017)

เมื่อสภาวะแวดล้อมในระบบเปลี่ยนแปลงไปหรือมีสารพิษบางชนิดเข้าสู่ระบบ จะสามารถทำให้ระบบอยู่ในภาวะไม่สมดุลหรือทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบได้

และหากในระบบมีปริมาณความเป็นต่างอยู่ในระดับที่ไม่เพียงพอ ก็จะส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดต่ำลงกว่าระดับที่เหมาะสม และเกิดสภาวะ “ระบบเป็นกรด” ได้ในที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงหรือไม่เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพเลย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของความเป็นกรดและความยาวนานที่ค่าพีเอชลดต่ำลง ในทางตรงกันข้าม สำหรับระบบที่ได้รับการควบคุมดูแลที่ดี จะพบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบมักมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในขณะที่ยุติลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนสูง จุลินทรีย์ได้ผลิตความเป็นต่างให้กับระบบด้วยนั่นเอง (Bajpai, 2017)

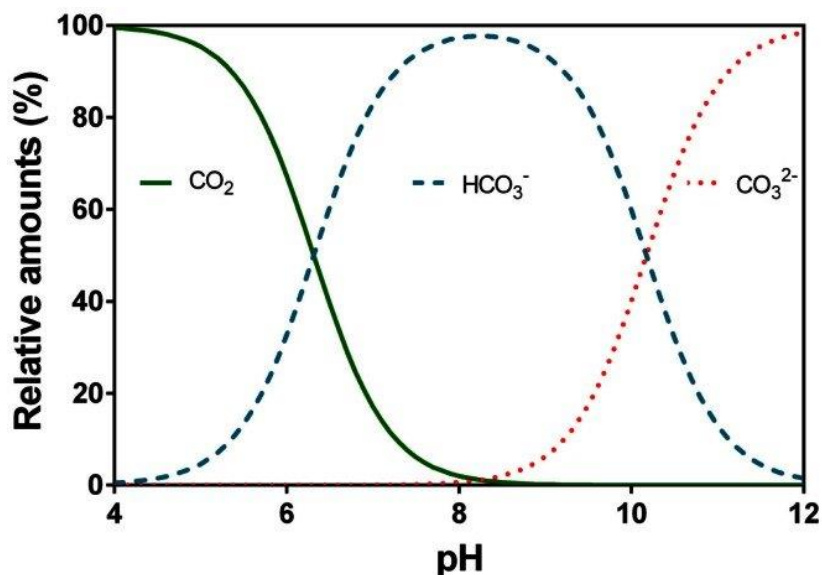
เนื่องจากอาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนเป็นจุลินทรีย์ที่มีความอ่อนไหวสูงที่สุดเมื่อพีเอชมีค่าต่ำ ดังนั้นสภาวะความเป็นกรดจึงมีผลสำคัญในการยับยั้งการเจริญเติบโตของอาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (Verma, 2002) ทั้งนี้ขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติกเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งซึ่งส่งผลให้เกิดการสร้างกรดอินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ซึ่งกรดเหล่านี้ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ดังนั้นการควบคุมดูแลระบบให้มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.5 – 7.6 จึงเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดี (Bajpai, 2017) สำหรับสารเคมีที่นิยมใช้เพื่อยกระดับค่าพีเอชในระบบมีดังตัวอย่างเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) โพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Potassium hydrogen carbonate) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ฯลฯ (Manyi-Loh et al., 2013) โดยทั่วไป เมื่อระบบมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.3 และมากกว่า 7.8 กิจกรรมของอาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนมักลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงส่งผลในการยับยั้งการผลิตมีเทน (Leitao, 2006) ทั้งนี้ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งทำให้อาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนดำเนินกิจกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นมักอยู่ในช่วงแคบ ๆ กล่าวคือ ระหว่าง 7.0 – 7.2 (Ostrem, 2004)

2.2.3 ความเป็นต่าง

ความเป็นต่างในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ หมายถึงความสามารถในการสะเทินความเป็นกรด (Acid-neutralizing capacity) หรือ ความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (Buffering capacity) โดยเป็นผลรวมของปริมาณคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่อยู่ในระบบ โดยทั่วไป การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมักควบคุมค่าพีเอชของระบบให้อยู่ในระดับเป็นกลางซึ่งในสภาวะดังกล่าว ระบบสำคัญที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความเป็นต่างของกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ คือ ระบบความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไบคาร์บอเนต (Carbon dioxide-bicarbonate system) (ภาพที่ 2.4) โดยความเป็นต่างในรูปของไบคาร์บอเนตไอออนเป็นรูปที่มีความสำคัญที่สุด (Kangle et al., 2011)

ภาพที่ 2.4

สัดส่วนปริมาณสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนในน้ำที่พีเอชระดับต่าง ๆ



หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Underwater Photosynthesis of Submerged Plants – Recent Advances and Methods,” โดย O. Pedersen, T. Colmer, K. and Sand-Jensen, 2013, *Frontiers in plant science*, น. 9. ปีลิขสิทธิ์ 2013 โดย Frontiers in Plant Science.

ความเป็นต่างเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศและช่วยทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยความเป็นต่างของระบบซึ่งอยู่ในรูปไบคาร์บอเนตไอออนจะสมดุลอยู่กับคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวที่ระดับค่าพีเอชหนึ่ง ๆ (ภาพที่ 2.4) (Gerardi, 2003) ทั้งนี้ความเป็นต่างในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศสามารถเกิดขึ้นได้เองจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดอะมิโนและโปรตีน เป็นต้น ซึ่งเมื่อสารประกอบชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวเกิดการย่อยสลาย จะเกิดการปลดปล่อยแอมโมเนียมไอออนออกมา และเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวที่สะสมอยู่ในระบบจะกลายเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้เมื่อกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เกิดการย่อยสลาย เกลือของกรดอินทรีย์จะปลดปล่อยไอออนบวกออกมา ซึ่งไอออนบวกที่ถูกปลดปล่อยออกมาเหล่านี้ จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลว และปลดปล่อยไบคาร์บอเนตไอออนออกมาเช่นกัน ส่วนแอลกอฮอล์และน้ำตาลเป็นสารประกอบที่เป็นกลาง ทำให้ปราศจากไอออนบวกเพื่อสะเทินความเป็นกรดที่เกิดขึ้นในระบบ จึงมีความต้องการความเป็นต่างเพื่อเอาไว้ใช้ในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบการย่อยสลาย สำหรับ

สารเคมีที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มความแตกต่างให้กับระบบมีหลายชนิด เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และปูนขาว (Lime, CaO) เป็นต้น และสำหรับระบบที่มีการควบคุมดูแลอย่างระมัดระวังก็สามารถใช้ก๊าซแอมโมเนีย (Anhydrous ammonia) เป็นสารเพิ่มความแตกต่างให้กับระบบได้ อย่างไรก็ตาม ในการใช้สารเคมีเพื่อรักษาระดับพีเอชของระบบการย่อยสลายก็ควรต้องมีความระมัดระวัง เพราะอาจส่งผลเสียบางอย่างเนื่องมาจากการแตกตัวเป็นไอออนของสารเคมีเหล่านี้ โดยการเกิดขึ้นของไอออนบวกบางชนิดสามารถก่อให้เกิดผลยับยั้งกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศได้ ดังตัวอย่างเช่น การมีโซเดียมไอออน (Na^+) อยู่ในระบบเป็นปริมาณมาก จะไปยับยั้งกระบวนการย่อยสลายและส่งผลเสียหายต่อระบบการย่อยสลายทั้งหมดได้ (Bajpai, 2017; Neshat et al., 2017)

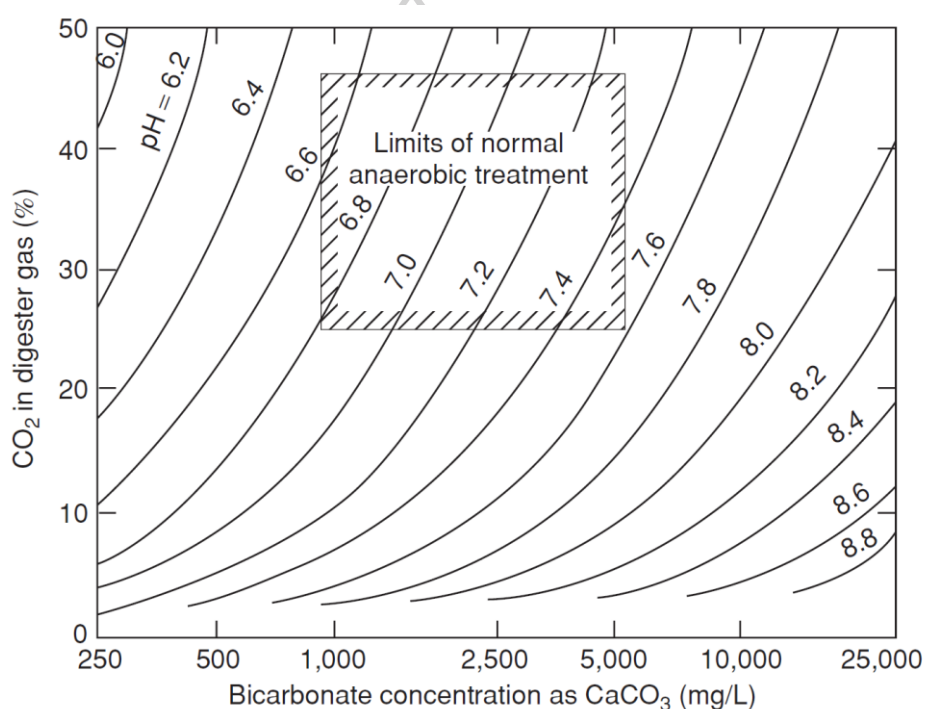
สำหรับความแตกต่างที่มีอยู่ในระบบจะต้องมีในปริมาณที่เพียงพอสำหรับสะเทินกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลาย โดยทั่วไป ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบปกติ ควรรักษาระดับความแตกต่างให้มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 1,000 – 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร (ภาพที่ 2.5) เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในระบบจะเห็นว่า คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในเฟสของก๊าซจะช่วยให้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในเฟสของเหลวมีความเข้มข้นสูงอยู่เสมอ จึงทำให้ค่าพีเอชในระบบลดต่ำลงจนกว่าจะมีการเติมสารให้ความแตกต่างในปริมาณที่เพียงพอเข้าไปในระบบ ส่วนการลดความดันของก๊าซในระบบลง จะช่วยผลักดันคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในเฟสของเหลวให้เคลื่อนที่ไปสู่เฟสของก๊าซมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบเพิ่มสูงขึ้นโดยปกติ ด้วยเหตุนี้จึงควรต้องมีความระมัดระวังหากมีการวัดค่าพีเอชในตัวอย่งน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ เพราะหากปล่อยตัวอย่งน้ำเสียที่ต้องการวัดค่าพีเอชทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง จะทำให้มีการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลวออกสู่บรรยากาศ ส่งผลให้ค่าพีเอชของตัวอย่งน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้เข้าใจไปได้ว่าค่าพีเอชของระบบอยู่ในระดับที่เหมาะสม ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วค่าพีเอชของระบบอาจอยู่ในระดับที่ไม่ปกติ (Bajpai, 2017)

โดยทั่วไประบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศสามารถผลิตความแตกต่างขึ้นได้เอง จึงมีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระดับหนึ่ง ดังเช่นการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ จะเกิดการปลดปล่อยแอมโมเนียออกมา และเมื่อไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในเฟสของเหลว จะกลายเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่เป็นสารปรับสภาพความแตกต่าง การย่อยสลายเกลือของกรดไขมันระเหยง่ายก็สามารถผลิตสารที่มีคุณสมบัติในการปรับสภาพความแตกต่างได้ นอกจากนี้การรีดักชันของซัลเฟตและซัลไฟด์ก็สามารถผลิตสารที่มีคุณสมบัติในการปรับสภาพความแตกต่างได้เช่นกัน ทั้งนี้เมื่อค่าพีเอชของระบบลดลงโดยมีสาเหตุมาจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย สารปรับสภาพต่างซึ่งเกิดขึ้นเองภายในระบบ

ดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการสะท้อนกับความเป็นกรดที่อยู่ภายในระบบเพื่อป้องกันการลดลงของค่าพีเอช แต่ถ้าหากความเป็นด่างในระบบมีไม่เพียงพอสำหรับการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ก็มีความจำเป็นต้องเติมสารเคมีสำหรับเพิ่มความเป็นด่างจากภายนอกเข้าไปในระบบดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ (Bajpai, 2017)

ภาพที่ 2.5

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ความเป็นด่างในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Anaerobic Waste Treatment Fundamentals,” โดย P. L. McCarty, 1964, *Public Work*, น. 125. ปิลิขสิทธิ์ 1964 โดย Public Work.

2.2.4 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย

กรดไขมันระเหยง่ายเป็นสารประกอบตัวกลางที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสร้างมีเทน ส่วนใหญ่ประกอบด้วย กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดพรอปิโอนิก (Propionic acid) กรดบิวทีริก (Butyric acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) กรดคาร์โปรอิก (Caproic acid) และกรดเอนแนนทิก (Enanthic acid) (Bajpai, 2017) กรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ ส่วนใหญ่จะเกิดการย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติก ซึ่งจะถูกล่อยสลายต่อไปกลายเป็นมีเทนผ่านวิถีการสร้างมีเทนโดยอาร์เคียที่ใช้กรดอะซิติกเป็นอาหาร (ภาพที่ 2.1) สำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

อากาศ การเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นถือเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องมาจากกระบวนการดังกล่าวจะช่วยให้การผลิตมีเทนมีเสถียรภาพมากขึ้นและช่วยสร้างสมดุลให้กับขั้นตอนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างมีเทน

ในขณะที่มีการดำเนินงานระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ภายในระบบอาจประสบกับภาวะการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงไปของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราการระบรทุกของวัสดุตั้งต้น พีเอช อุณหภูมิ และความดันส่วนของไฮโดรเจน เป็นต้น ทั้งนี้กรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมอยู่ภายในระบบ จะทำให้เกิดความเป็นพิษกับระบบ หรือในกรณีร้ายแรง อาจส่งผลยับยั้งกระบวนการย่อยสลายได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของกรดไขมันระเหยง่าย ดังตัวอย่างเช่น การสะสมของกรดพรอพิโอนิก ปริมาณเพียง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถส่งผลร้ายแรงต่ออาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน จึงทำให้การผลิตมีเทนหยุดชะงักหรือมีอัตราการผลิตลดลง ส่วนการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่น ๆ เช่น กรดบิวทีริก และกรดอะซิติก แม้ว่าจะมีความรุนแรงน้อยกว่ากรดพรอพิโอนิก แต่ก็สามารถทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดความล้มเหลวได้ หากในระบบมีความเข้มข้นของกรดดังกล่าวสูงถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Inanc et al., 1999)

การสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ในระบบ สามารถทำให้ค่าพีเอชของระบบลดต่ำลงน้อยกว่า 6 ซึ่งค่าพีเอชที่มีระดับต่ำดังกล่าวมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของอาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน หรือมีผลทำให้วิถีการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบโดยจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ โดยทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นที่ต้องการหรือไม่เกิดประโยชน์กับระบบ (Bah et al., 2014; Neshat et al., 2017) โดยทั่วไป สำหรับระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศที่ได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้องและมีการควบคุมกระบวนการดำเนินงานที่ดี ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมักอยู่ในระดับต่ำกว่า 500 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 1,500 – 2,000 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร สามารถส่งผลยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ (Bajpai, 2017)

ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่ามูลสัตว์เป็นวัสดุอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีความจุของความเป็นต่างสูงและมีการนำไปใช้ประโยชน์ในการสะท้อนความเป็นกรดในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศได้เป็นอย่างดี ดังตัวอย่างในการศึกษาต่าง ๆ เช่น การศึกษาของ Cheng and Zhong (2014) ได้ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของลำต้นฝ้ายเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับกรหมักร่วมระหว่างลำต้นฝ้ายและมูลสุกร ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบที่ใช้การหมักร่วมจะมีปริมาณสูงกว่าถึงสิบเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในระบบการหมักแบบชนิดเดียว แต่ระบบที่ใช้การ

หมักร่วมก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่ดี ทั้งนี้เนื่องมาจากการมีอยู่ของมูลสุกรในระบบ นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้รายงานถึงการพบกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบสำคัญอยู่ในกรดไขมันระเหยง่ายของระบบการหมักร่วมอีกด้วย ในอีกการศึกษาหนึ่งซึ่งดำเนินการโดย Bah et al. (2014) สังเกตพบกรดไขมันระเหยง่ายความเข้มข้นสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 300 – 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในระบบการหมักร่วมระหว่างเส้นใยปาล์มและมูลวัว ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายในระดับสูงดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นซึ่งอุดมด้วยไขมัน Estevez et al. (2014) รายงานว่า ในระบบการหมักร่วมระหว่างมูลวัวและต้นสนุ่น (Salix) วิเคราะห์พบความเข้มข้นสูงสุดของกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่อยู่ในระดับต่ำมากจากปริมาณที่สามารถทำให้เกิดการยับยั้งขึ้นในระบบการย่อยสลาย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากข้อดีของการใช้มูลวัวซึ่งมีความจุของความเป็นต่างสูงนั่นเอง ส่วน Rico et al. (2015) ได้ดำเนินการศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในถังหมักยูเอเอสบี (UASB) โดยใช้การหมักร่วมระหว่างมูลวัวและหางนม (Cheese whey) คณะผู้วิจัยรายงานว่า ตรวจไม่พบปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ออกจากระบบยูเอเอสบี จนกระทั่งได้มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมภายในถังหมัก ซึ่งทำให้ความเสถียรของระบบเริ่มลดลง ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการป้อนวัสดุตั้งต้นเข้าระบบโดยมีการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างหางนมและมูลวัวให้สูงขึ้น (หางนมร้อยละ 85)

อย่างไรก็ตาม วิธีที่ดีที่สุดในการยับยั้งความเป็นกรดของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้นคือ ให้หยุดการป้อนวัสดุอินทรีย์ตั้งต้นเข้าระบบ และปล่อยให้อาร์เคียที่สร้างมีเทนโดยใช้กรดอะซิติกเป็นอาหารเจริญเติบโตและยกระดับค่าพีเอชของระบบโดยการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมอยู่ในระบบ ซึ่งการดำเนินการในลักษณะดังกล่าวได้มีการรายงานไว้ในการศึกษาของ Aboudi et al. (2015) ซึ่งดำเนินการวิจัยในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศในถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยเป็นการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล ซึ่งผู้วิจัยสามารถกู้ระบบการย่อยสลายคืนได้หลังประสบกับภาวะความเป็นกรด โดยหยุดการป้อนวัสดุอินทรีย์ตั้งต้นเพื่อลดความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย ทั้งนี้การดำเนินการดังกล่าวประสบความสำเร็จด้วยดี โดยไม่มีการยับยั้งใด ๆ เกิดขึ้นในระบบ

2.2.5 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแสดงถึงความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณของคาร์บอนและไนโตรเจนในวัสดุอินทรีย์ตั้งต้น และเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ เนื่องจากอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์มักได้รับอิทธิพลจากชนิดและความยากง่ายต่อการย่อยสลายของสารอินทรีย์ชนิดนั้น ๆ โดยทั่วไปวัสดุอินทรีย์ตั้งต้นมักมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.1) สารอินทรีย์ใดที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

สูงแสดงว่าสารอินทรีย์นั้นอุดมไปด้วยคาร์บอน ส่วนสารอินทรีย์ใดที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำแสดงว่าสารอินทรีย์นั้นอุดมไปด้วยโปรตีน (Yen & Chiu, 2007) ทั้งนี้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนสำหรับสารอินทรีย์ในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนไม่ควรมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงเกินไปเป็นสาเหตุทำให้จุลินทรีย์ในระบบขาดไนโตรเจนเพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ส่งผลให้อาร์เคียกลุ่มที่สร้างมีเทนหยุดการเจริญเติบโต จึงทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และอาจทำให้ระบบการย่อยสลายล้มเหลวได้ในที่สุด ในทางตรงกันข้าม อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีค่าต่ำเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หยุดชะงักเนื่องจากการขาดคาร์บอน และระบบจะอุดมไปด้วยโปรตีน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียในระบบ และเป็นสาเหตุทำให้ค่าพีเอชในระบบเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้หากค่าพีเอชในระบบเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่า 8.5 ก็จะก่อให้เกิดความเป็นพิษแก่อาร์เคียกลุ่มที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนได้ (Li et al., 2011; Matheri et al., 2018)

ทั้งนี้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมของสารอินทรีย์สำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนและส่งผลดีต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพควรมีอัตราส่วนอยู่ระหว่าง 20 – 30 (Kothari et al., 2014; Li et al., 2011) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าวัสดุอินทรีย์ที่ได้จากพืชผักมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเนื่องจากเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส จึงมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ มักมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างต่ำ หากนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ จะทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพ อันเนื่องมาจากการขาดแคลนคาร์บอน อย่างไรก็ตาม ปัญหาความไม่เหมาะสมของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุอินทรีย์ตั้งต้นบางชนิดดังกล่าว สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ระบบการหมักร่วม (Co-digestion) ดังตัวอย่างเช่น Lehtomäki et al. (2007) รายงานว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมคือ 25 – 32 ขณะที่มูลวัวมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ระหว่าง 11 – 14 ซึ่งในการจัดการกับปัญหาความไม่เหมาะสมของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของมูลวัว คณะผู้วิจัยได้เติมเศษเหลือจากพืชลงไป ในมูลวัวประมาณร้อยละ 30 – 40 ส่งผลให้สารอินทรีย์ผสมมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นเป็น 15 – 25 โดยมีค่าใกล้เคียงกับระดับที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักร่วม Cheng and Zhong (2014) รายงานว่า ต้นฝ้ายมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 50 โดยเป็นค่าที่เบี่ยงเบนไปมากจากค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และเมื่อเติมมูลสุกรเพิ่มลงไป ในตัวอย่างวัสดุลิกโนเซลลูโลสดังกล่าว เพื่อปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารอินทรีย์ผสมโดยให้มีค่าเท่ากับ 25 ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ นอกจากนี้ในรายงานของ Zhang et al. (2016) ซึ่งทำการศึกษาการหมักร่วมของสารอินทรีย์ผสมระหว่างลำต้นถั่วเหลืองและมูลวัว โดยได้ทำการปรับ

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารอินทรีย์ผสมดังกล่าวด้วยยูเรียให้มีค่าเท่ากับ 25 ผลการศึกษาพบว่า การย่อยสลายของสารอินทรีย์ผสมที่ผ่านการปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 413 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าการย่อยสลายที่ใช้ลำต้นถั่วเหลืองเพียงอย่างเดียว คิดเป็นร้อยละ 26

ตารางที่ 2.1

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

วัสดุอินทรีย์ตั้งต้น	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
มูลวัว มูลควาย มูลแกะ มูลหมู และมูลม้า (Cow, buffalo, sheep, pig and horse manures)	15 – 40
มูลสัตว์ปีก (Poultry manure)	5.2
ของเสียจากปลา (Fish wastes)	2.5 – 5.5
ของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ (Slaughter house wastes)	2 – 4
เศษพืชผัก (Vegetable wastes)	11 – 19
เศษผลไม้ (Fruit wastes)	25 – 50
เปลือกมันสำปะหลัง (Cassava peels)	55
เปลือกถั่ว (Yam peels)	36
เปลือกมันเทศ (Sweet potato peels)	40 – 46
กากถั่ว (Bean wastes)	24 – 30
ขานอ้อย ฟางข้าวสาลี ฟางข้าว (Bagasse, wheat and rice straw)	120 – 150
ลำต้นข้าวโพด (Corn stalks)	60
ขี้เลื่อย (Sawdust)	200 – 511
ของเสียจากกล้วยกล้วย (Plantain wastes)	30 – 37

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก 1) “Analysis of the Effect of Carbon/Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Biogas Yields For Non-Uniform Multiple Feed Stock Availability and Composition in Nigeria,” โดย O. W. Orhororo, E. K. Orhororo, and P. O. Ebunilo, 2016, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(5), น. 120. ปีลิขสิทธิ์ 2016 โดย International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2) “Biogas Generation through Anaerobic Digestion Process – An Overview,” โดย S. Velmurugan, B. Deepanraj, and S. Jayaraj, 2014, *Research Journal of Chemistry and Environment*, 18, น. 85. ปีลิขสิทธิ์ 2018 โดย Research Journal of Chemistry and Environment.

2.2.6 อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์

ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศมักมีการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ส่วนที่สามารถเกิดการย่อยสลายได้ในรูปของแข็งระเหยง่าย ซึ่งปริมาณของแข็งระเหยง่ายในสารอินทรีย์จัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องให้ความสนใจก่อนเริ่มเดินระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ เพราะปริมาณของแข็งระเหยง่ายเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถเกิดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ด้วยเหตุนี้อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ซึ่งก็คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของถังหมัก จึงมักแสดงในรูปของปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร นอกจากนี้อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ยังสามารถแสดงได้ในรูปของความต้องการออกซิเจนทางเคมี (ซีโอดี) ต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นจึงสามารถประเมินอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ได้โดยใช้สมการที่ 15 หรือ 16 (Kothari et al., 2014; Noraini et al., 2017)

$$\text{OLR} = \frac{Q \times \text{VS}}{V} \quad (15)$$

$$\text{OLR} = \frac{Q \times \text{COD}}{V} \quad (16)$$

โดย OLR = อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ (กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตร-วัน หรือ กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน)

V = ปริมาตรของถังหมัก (ลูกบาศก์เมตร)

VS = ความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่าย (กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อกิโลกรัม หรือ กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตร)

COD = ความเข้มข้นของซีโอดี (กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อกิโลกรัม หรือ กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลูกบาศก์เมตร)

Q = อัตราการไหล (กิโลกรัมต่อวัน หรือ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)

อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ในถังหมักเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการควบคุมการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เพราะสามารถส่งผลกระทบต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (Kothari et al., 2014) ทั้งนี้เมื่ออัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม

หากอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าสูงมากเกินไป จะส่งผลให้ภายในถังหมักมีสถานะของการมีสารอินทรีย์มากเกินไป (Overload) โดยเป็นผลสืบเนื่องมาจากการสะสมของสารยับยั้งต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น กรดไขมันระเหยง่าย เป็นต้น ทั้งนี้ในสถานะที่มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์ในอัตราที่สูง แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส และในขั้นตอนการสร้างกรดจะสามารถผลิตกรดไขมันระเหยง่ายได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ภายในระบบมีสถานะเป็นกรด จึงเกิดการยับยั้งกระบวนการไฮโดรไลซิส และทำให้อาร์เคียซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนไม่สามารถเปลี่ยนสารประกอบที่เกิดขึ้นในขั้นตอนก่อนหน้าไปเป็นมีเทนได้ ส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบลดลงในที่สุด (Kwietniewska & Tys, 2014; Mao et al., 2015)

สำหรับในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้มีการรายงานว่ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ปริมาณ 3 กิโลกรัมของแข็งรวมต่อลูกบาศก์เมตร-วัน จัดเป็นอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ปริมาณสูงสุดที่จุลินทรีย์สามารถรองรับได้ (Deublein & Steinhauser, 2008) และในการศึกษาของ Aboudi et al. (2015) มีการรายงานว่ การหมักร่วมระหว่างผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลจากซูการ์บีทและมูลสุกรที่มีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 12.8 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตรของปริมาตรถังหมัก ประสบกับสถานะวิกฤติ โดยพบว่า ระบบไม่เกิดการย่อยสลายและการผลิตก๊าซมีเทน กล่าวคือ ระบบมีภาวะความไม่เสถียรเกิดขึ้นเนื่องมาจากอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ระดับดังกล่าว ส่วนในอีกชุดการทดลองหนึ่ง ซึ่งดำเนินการโดย Li (2016) ได้ตรวจสอบผลของการป้อนอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในระดับที่แตกต่างกันสำหรับการหมักร่วมระหว่างมูลม้าและหญ้าในระบบการย่อยสลายแบบกึ่งต่อเนื่องต่อผลผลิตมีเทน ผลการศึกษาพบว่า ระบบการหมักร่วมดังกล่าวให้ผลผลิตมีเทนลดน้อยลงโดยมีปริมาณเท่ากับ 152.9 149.6 และ 141.1 มิลลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย เมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นเป็นปริมาณเท่ากับ 1.25 1.88 และ 2.5 กรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ และพบว่า อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1.88 กรัมของแข็งระเหยต่อวัน โดยมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำ (Hydraulic retention time, HRT) เท่ากับ 14 วัน

อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ นอกจากจะส่งผลต่อกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์แล้ว ยังมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสมของปั๊มซึ่งทำหน้าที่ในการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอีกด้วย ทั้งนี้การป้อนอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในอัตราที่สูงเข้าสู่ระบบสามารถทำความเสียหายให้กับปั๊มได้ เนื่องจากปั๊มมักมีข้อจำกัดในการขนถ่ายสารซึ่งอยู่ในเฟสของแข็ง (Tchobanoglous et al., 2003)

2.2.7 ระยะเวลาการกักเก็บ

ระยะเวลาการกักเก็บเป็นพารามิเตอร์สำคัญอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญสำหรับการออกแบบและการปรับแต่งระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศให้มีความเหมาะสมที่สุด

โดยเป็นระยะเวลาตามทฤษฎีที่สารอินทรีย์หรือน้ำเสียซึ่งถูกป้อนเข้าสู่ระบบอยู่ในถังหมักและเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ ระยะเวลาการกักเก็บสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บน้ำ (Hydraulic retention time, HRT) และระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ (Solid retention time, SRT) ทั้งนี้ระยะเวลาการกักเก็บน้ำ หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการกักเก็บส่วนที่เป็นของเหลวให้อยู่ภายในถังหมัก ส่วนระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการกักเก็บส่วนที่เป็นเชื้อจุลินทรีย์ให้อยู่ภายในถังหมัก สำหรับระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งวัสดุตั้งต้นและเชื้อจุลินทรีย์หลากหลายชนิดมีการผสมอยู่ด้วยกันในขั้นตอนเดียว ระยะเวลาการกักเก็บน้ำและระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์จะเท่ากัน ทั้งนี้ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศของเศษอาหาร ของเสียจากห้องครัว ขยะมูลฝอยชุมชน จัดเป็นตัวอย่างของระบบที่มีระยะเวลาการกักเก็บน้ำและระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์เท่ากัน ส่วนวัสดุตั้งต้น เช่น กากตะกอนจากระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (Waste activated sludge) และกากตะกอนจากถังตกตะกอนขั้นที่หนึ่ง (Primary sludge) มักใช้ระบบการย่อยสลายที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างกากตะกอนและเชื้อจุลินทรีย์เป็นแบบสองขั้นตอน จึงทำให้ระยะเวลาการกักเก็บน้ำและระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์แตกต่างกัน ทั้งนี้สามารถประเมินระยะเวลาการกักเก็บน้ำและระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ได้โดยใช้สมการที่ 17 และ 18 ตามลำดับ (Sarker et al., 2019; Yoon et al., 2004)

$$HRT = \frac{V}{Q} \quad (17)$$

$$SRT = \frac{V \cdot X}{Q_x \cdot X_x} \quad (18)$$

- โดย HRT = ระยะเวลาการกักเก็บน้ำ (วัน)
 SRT = ระยะเวลาการกักเก็บตะกอน (วัน)
 V = ปริมาตรของถังหมัก (ลูกบาศก์เมตร)
 Q = อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 X = ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย (Mixed liquor suspended solids) ในถังปฏิกรณ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 Q_x = อัตราการกำจัดตะกอนส่วนเกิน (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
 X_x = ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในตะกอนส่วนเกินที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยทั่วไป ระยะเวลาการกักเก็บน้ำมักมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น ปริมาตรของถังหมัก การควบคุมกระบวนการ และอุณหภูมิ เป็นต้น สำหรับวัสดุตั้งต้นซึ่งอุดมไปด้วยแป้งและน้ำตาลสามารถเกิดการย่อยสลายได้อย่างง่ายดาย ดังนั้นการไฮโดรไลซิสจึงใช้ระยะเวลาไม่นานหรือเป็นขั้นตอนที่ไม่จำเป็น จึงส่งผลให้ระยะเวลาการกักเก็บน้ำสั้นลง ขณะที่วัสดุจากพืชจำพวกลิกโนเซลลูโลสซึ่งอุดมด้วยไฟเบอร์และเซลลูโลสจะมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่ยาวนานกว่า เนื่องจากการไฮโดรไลซิสของวัสดุดังกล่าวเป็นไปอย่างช้า ๆ ส่วนอุณหภูมิที่สูงภายในถังหมักจะช่วยให้อัตราการย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ระยะเวลาการกักเก็บน้ำสั้นลง จึงเป็นสาเหตุทำให้การเดินระบบภายใต้ช่วงอุณหภูมิสูงโดยส่วนใหญ่มักมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำสั้นกว่าการเดินระบบภายใต้ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 2 แบบ ได้แก่ ระยะเวลาการกักเก็บน้ำแบบสั้นกว่า และระยะเวลาการกักเก็บน้ำแบบยาวนานกว่า จะพบว่า ระยะเวลาการกักเก็บน้ำแบบสั้นกว่ามีความเสี่ยงจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการสะสมกรดไขมันระเหยง่ายชนิดที่มีมวลโมเลกุลสูง ได้แก่ กรดพอฟิโอนิก ซึ่งจะไปยังยังการเจริญเติบโตของอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทน ส่วนระยะเวลาการกักเก็บน้ำแบบยาวนานกว่าจะทำให้ขนาดของถังหมักมีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้ ระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ จึงไม่ควรสั้นหรือยาวนานเกินไป ซึ่งระยะเวลาการกักเก็บน้ำโดยส่วนใหญ่มักมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 25 วัน อย่างไรก็ตาม ในสภาพภูมิอากาศเย็น ระยะเวลาการกักเก็บน้ำจะมีความยาวนานอย่างมาก โดยอาจมีระยะเวลาเพิ่มขึ้นอีก 50 – 100 วัน หรือมากกว่า (Sarker et al., 2019)

สำหรับการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นกากตะกอนภายใต้สภาวะไร้อากาศ จำเป็นต้องคำนึงถึงระยะเวลาการกักเก็บทั้ง 2 ประเภท กล่าวคือ คำนึงถึงทั้งระยะเวลาการกักเก็บน้ำ และระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ โดยจากการศึกษาของ Huang et al. (2011) ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนไร้อากาศแบบจมตัว (Submerged anaerobic membrane bioreactor, SAnMBR) ซึ่งมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 12 วัน แต่มีระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์เป็นอนันต์ (Infinite SRT) พบว่า อัตราการผลิตก๊าซมีเทนได้เพิ่มสูงขึ้นเป็นสองเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเดินระบบที่มีระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์เพียง 30 วัน อย่างไรก็ตาม ในรายงานการศึกษาของ Nges and Liu (2010) ให้ผลตรงกันข้าม โดยพบว่า ระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ที่สั้นลง (อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น) ให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นช่วยส่งเสริมให้มีการเพิ่มจำนวนของอาร์เคียซึ่งทำหน้าที่สร้างมีเทน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ก็มีผลสะสมกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มสูงขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าระบบมีสภาวะการมีสารอินทรีย์มากเกินไปเกิดขึ้นแล้ว ด้วยเหตุนี้ จะเห็นได้ว่า การทำความเข้าใจที่เกิดขึ้นระหว่างระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์และอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์จัดเป็นสิ่งที่

สำคัญในการควบคุมการดำเนินงานเพื่อให้ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

โดยทั่วไปแล้ว มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการเริ่มต้นเดินระบบที่ต้องให้มีระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ที่ยาวนานกว่าปกติ รวมทั้งให้มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในอัตราที่ต่ำกว่าปกติ ทั้งนี้เพื่อให้จุลินทรีย์ได้ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ และเพื่อให้จุลินทรีย์ที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้าได้ปรับตัวและเพิ่มจำนวน (Akram & Stuckey, 2008) และเมื่อระบบอยู่ในสภาวะที่สมดุลแล้ว ก็สามารถเดินระบบให้มีระยะเวลาการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ที่สั้นลงได้ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายให้มีผลผลิตมีเทนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ในรายงานการศึกษาที่ผ่านมาของ Vanwonderghem et al. (2015) พบว่า การปรับระยะเวลาการกักเก็บตะกอนให้สั้นลงจะช่วยควบคุมกระบวนการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายได้ โดยจะทำให้เกิดการสับเปลี่ยนของสังคมจุลินทรีย์จากวิถีการผลิตหนึ่งไปสู่อีกวิถีหนึ่ง ดังเช่น จากอาร์เคียที่ใช้กรดอะซิติกเป็นอาหาร เป็นอาร์เคียที่ชอบหรือใช้ไฮโดรเจนเป็นอาหาร นอกจากนี้การปรับระยะเวลาการกักเก็บน้ำให้สั้นลงก็ให้ผลที่คล้ายคลึงกัน แต่จะทำให้เกิดการสับเปลี่ยนจากการสร้างมีเทนเป็นการสร้างกรดไขมันระเหยง่าย (Gagliano et al., 2015)

2.2.8 ความชื้น

น้ำเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ เนื่องจากทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายและช่วยให้เกิดการถ่ายเทมวลและการแพร่ในจุลินทรีย์ขณะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุตั้งต้นกับจุลินทรีย์ที่มีความเกี่ยวข้องในกระบวนการ เมื่อพิจารณาจากปริมาณความชื้นเป็นเกณฑ์ ทำให้สามารถจำแนกประเภทของกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบเปียก (Wet digestion) การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบกึ่งแห้ง (Semi-dry digestion) และการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบแห้ง (Dry digestion) ซึ่งแต่ละประเภทมีการเดินระบบโดยมีปริมาณของแข็งรวมดังต่อไปนี้ น้อยกว่าร้อยละ 10 อยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 15 และมากกว่าร้อยละ 15 ตามลำดับ (Abouelenien et al., 2016; Kothari et al., 2014; Zeshan et al., 2012)

โดยส่วนใหญ่ ปริมาณความชื้นในระดับที่สูงจะช่วยให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม การรักษาระดับความชื้นให้คงที่ตลอดระยะเวลาการย่อยสลายมักทำได้ค่อนข้างยาก (Hernandez-Berriel et al., 2008) ทั้งนี้ปริมาณมากที่เติมลงไปในระบบในระยะแรกเริ่มมักจะมีปริมาณลดน้อยลงจนอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำเมื่อกระบวนการย่อยสลายยังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ในรายงานการศึกษาของ Fujishima et al. (2000) ซึ่งได้ตรวจสอบผลของปริมาณความชื้นต่อการผลิตมีเทนจากการย่อยสลายกากตะกอนที่ผ่านการรีดน้ำ ผลการศึกษาพบว่า การผลิตมีเทนมีปริมาณลดน้อยลง เมื่อปริมาณ

ความชื้นมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 91.1 และในการศึกษาของ Hernandez-Berriel et al. (2008) ซึ่งได้ทำการตรวจสอบการสลายมีเทนภายใต้การย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศที่ระดับความชื้น 2 ระดับคือ ร้อยละ 70 และร้อยละ 80 ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความชื้นทั้ง 2 ระดับดังกล่าว ต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 70 วัน จึงมีการสร้างมีเทนเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ในระบบการย่อยสลายซึ่งมีระดับความชื้นร้อยละ 70 พบว่า น้ำที่ระบายออกจากระบบมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงกว่า รวมทั้งมีอัตราการผลิตมีเทนสูงกว่า และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ในระบบการย่อยสลายซึ่งมีระดับความชื้นร้อยละ 70 ให้ผลผลิตมีเทนปริมาณ 71 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งรวม ส่วนในระบบการย่อยสลายซึ่งมีระดับความชื้นร้อยละ 80 ให้ผลผลิตมีเทนปริมาณ 70 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งรวม นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบการย่อยสลายภายใต้ความชื้นทั้ง 2 ระดับดังกล่าวมีอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อซีโอดี (0.68) ใกล้เคียงกัน

2.2.9 สารอาหาร

กระบวนการทางชีวภาพประเภทต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้อากาศจัดเป็นกระบวนการที่มีความต้องการสารอาหารหลัก (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน) และสารอาหารรอง (โลหะปริมาณน้อย) ในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม เพื่อให้จุลินทรีย์ที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวภาพนั้น นำไปใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์สำหรับอาร์เคียซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน นอกจากนี้จะมีความต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารหลักแล้ว ยังมีความต้องการโลหะปริมาณน้อยชนิดต่าง ๆ ด้วย เช่น นิกเกิล (Nickel, Ni) โคบอลต์ (Cobalt, Co) เหล็ก (Iron, Fe) โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) และซีลีเนียม (Selenium, Se) เป็นต้น ทั้งนี้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีความต้องการสารอาหารหลักและโลหะปริมาณน้อยในปริมาณค่อนข้างต่ำ เนื่องจากซีโอดีเพียงร้อยละ 4 – 10 ของปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัดเท่านั้น ที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความต้องการสารอาหารระหว่างจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศหรือไม่ต้องการออกซิเจนกับจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศหรือต้องการออกซิเจน พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งความแตกต่างของปริมาณความต้องการสารอาหารดังกล่าวเป็นผลสืบเนื่องมาจากระบบเอนไซม์ที่มีความเฉพาะเจาะจงของอาร์เคียซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน ทั้งนี้ในขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นมีเทนจะมีความต้องการสารอาหารเหล่านี้ ได้แก่ โคบอลต์ เหล็ก นิกเกิล กำมะถัน ซีลีเนียม ทั้งสแตน และ โมลิบดีนัม รวมถึงมีความต้องการสารอาหารรอง ได้แก่ แบริียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียม เมื่อพิจารณาความต้องการสารอาหารหลัก พบว่า กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีความต้องการสารอาหารหลักในปริมาณที่น้อยกว่ากระบวนการย่อยสลายแบบใช้อากาศเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการที่ให้ผลผลิตเซลล์ต่ำ โดยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

จะต้องอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟต ตามลำดับ สำหรับปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จำเป็นกับระบบ เพื่อให้ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมนั้น จะพิจารณาจากความเข้มข้นของสารอาหารที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ซึ่งตกค้างอยู่ในน้ำที่ระบายออกมาจากระบบ โดยควรมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมแอมโมเนียม (NH_4^+) ต่อลิตร และ 1 – 2 มิลลิกรัมออร์โธฟอสเฟต (HPO_4^-) ต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งหากตรวจไม่พบสารอาหารดังกล่าวตกค้างอยู่ในน้ำที่ระบายออกมาจากระบบ ก็จำเป็นต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่มเข้าไปในระบบ สำหรับการเติมสารอาหารไนโตรเจนสามารถใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride) แอมโมเนียเหลว (Aqueous ammonia) และยูเรีย (Urea) ส่วนการเติมสารอาหารฟอสฟอรัสสามารถใช้เกลือฟอสเฟต (Phosphate salts) และกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ทั้งนี้มีอาร์เคียที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนได้ และบางชนิดสามารถใช้กรดอะมิโน (Amino acid) หรืออะลานีน (Alanine) ได้ สำหรับความต้องการสารอาหารของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศนั้น มักเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับอัตราภาวะบรรทุกระบบสารอินทรีย์ โดยทั่วไปของเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำควรปรับอัตราส่วนระหว่างสารอินทรีย์และสารอาหารในรูปของ ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ให้มีค่าเท่ากับ 1,000 : 7 : 1 ส่วนของเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงควรปรับอัตราส่วนระหว่างสารอินทรีย์และสารอาหารในรูปของ ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ให้มีค่าเท่ากับ 350 : 7 : 1 (Bajpai, 2017; Khanal, 2008)

2.2.10 สารที่เป็นพิษ

1) ความเป็นพิษจากเกลือ (Toxicity by salts)

โดยปกติ ความเป็นพิษจากเกลือไม่ได้เกิดขึ้นจากไอออนลบของเกลือ แต่เกิดขึ้นจากไอออนบวกของเกลือ ทั้งนี้ Kugelmann and McCarty (1965) ได้ทำการประเมินความเป็นพิษของไอออนบวก และแสดงให้เห็นว่า การยับยั้งมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น (เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์) เป็นลำดับดังนี้ โซเดียมไอออน (Na^+ , 0.32 โมลาร์) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+ , 0.25 โมลาร์) โพแทสเซียมไอออน (K^+ , 0.15 โมลาร์) แคลเซียมไอออน (Ca^{2+} , 0.11 โมลาร์) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+} , 0.08 โมลาร์) อย่างไรก็ตาม จากรายงานการศึกษาต่าง ๆ เมื่อไม่นานมานี้ แสดงให้เห็นว่า ระดับความเข้มข้นของการยับยั้งสามารถเพิ่มสูงขึ้นได้อีก แต่วัสดุอินทรีย์ตั้งต้นต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมการบางอย่างหรือผ่านขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้นมาก่อน (de Lemos Chernicharo, 2007)

ทั้งนี้หากพบว่า น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบการบำบัดภายใต้สภาวะไร้อากาศมีความเข้มข้นของไอออนบวกบางชนิดอยู่ในระดับที่สามารถยับยั้งกระบวนการย่อยสลายได้นั้น จะสามารถลดระดับ ความรุนแรงของการยับยั้งในกรณีดังกล่าวลงได้ (de Lemos Chernicharo, 2007) โดยหากภายในระบบมีไอออนบวกชนิดอื่นที่มีฤทธิ์หักล้างกัน (Antagonism) หรือ อาจมีการเติมไอออนบวกชนิดอื่นที่มีฤทธิ์หักล้างกันเพิ่มลงไป ซึ่งโซเดียมและโพแทสเซียมจัดเป็นไอออนบวกที่ดีที่สุด

ในการนำไปใช้ในกรณีดังกล่าว แต่ทั้งนี้ต้องใช้ในระดับความเข้มข้นสำหรับการกระตุ้นเท่านั้น (ตารางที่ 2.2) และโดยปกติมักนิยมเติมไอออนบวกชนิดที่มีฤทธิ์หักล้างกันในรูปแบบของเกลือคลอไรด์ (McCarty, 1964)

ตารางที่ 2.2

ระดับความเข้มข้นของไอออนบวกบางชนิดที่สามารถกระตุ้นและยับยั้งกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ไอออนบวก	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งรุนแรง
โซเดียม (Na ⁺)	100 – 200	3,500 – 5,500	8,000
โพแทสเซียม (K ⁺)	200 – 400	2,500 – 4,500	12,000
แคลเซียม (Ca ²⁺)	100 – 200	2,500 – 4,500	8,000
แมกนีเซียม (Mg ²⁺)	75 – 150	1,000 – 1,500	3,000

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Anaerobic Waste Treatment Fundamentals,” โดย P. L. McCarty, 1964, *Public Work*, 95, น. 92. ลิขสิทธิ์ [1964] โดย Public Work.

2) ความเป็นพิษจากแอมโมเนีย (Toxicity by ammonia)

ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ มักมีแอมโมเนียเกิดขึ้นเป็นปกติ โดยเป็นผลมาจากการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ตั้งต้นที่อุดมไปด้วยยูเรียหรือโปรตีน และมักพบอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate) ซึ่งจัดเป็นสารที่มีประโยชน์ต่อระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยเป็นแหล่งของไนโตรเจนและทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์เพื่อต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของระบบ อย่างไรก็ตาม ทั้งแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) และแอมโมเนียอิสระ (NH₃) สามารถกลายเป็นสารยับยั้งได้ หากมีความเข้มข้นอยู่ในระดับสูง ทั้งนี้แอมโมเนียทั้ง 2 รูปดังกล่าว จะมีความสมดุลซึ่งกันและกัน และมีปริมาณที่สัมพันธ์กัน โดยขึ้นอยู่กับค่าพีเอชภายในระบบ ดังแสดงในสมการที่ 19 (McCarty, 1964)



จากสมการที่ 19 เมื่อไฮโดรเจนไอออนในระบบมีความเข้มข้นอยู่ในระดับสูง (พีเอช ≤ 7.2) สมดุลจะเลื่อนไปทางด้านซ้ายของสมการ การยับยั้งที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน แต่เมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในระบบจะมี

ปริมาณลดลง สมดุลก็จะเลื่อนไปทางด้านขวาของสมการ ซึ่งการเกิดสถานการณ์ในลักษณะนี้ จะส่งผลให้แอมโมเนียอิสระกลายเป็นสารยับยั้ง ทั้งนี้มีหลายการศึกษาแสดงให้เห็นว่า หากในระบบมีความเข้มข้นของแอมโมเนียอิสระมากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษกับอาร์เคียที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน ในขณะที่แอมโมเนียไฮดรอกไซด์จำกัดความปลอดภัยสูงสุดอยู่ที่ระดับความเข้มข้นประมาณ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทั่วไป ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลรวมของแอมโมเนียไฮดรอกไซด์และแอมโมเนียอิสระที่ส่งผลดีและผลเสียต่อกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

ผลของแอมโมเนีย (ปริมาณแอมโมเนียไฮดรอกไซด์และแอมโมเนียอิสระ) ต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)	ผลกระทบ
50 – 200	เป็นประโยชน์
200 – 1,000	ไม่ส่งผลกระทบ
1,500 – 3,000	เป็นสารยับยั้ง เมื่อค่าพีเอช > 7.4 – 7.6
> 3,000	เป็นพิษ

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Anaerobic Waste Treatment Fundamentals,” โดย P. L. McCarty, 1964, *Public Work*, 95, น. 92. ปีลิขสิทธิ์ [1964] โดย Public Work.

3) ความเป็นพิษจากซัลไฟด์ (Toxicity by sulfide)

ความเป็นพิษจากซัลไฟด์เป็นปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นได้กับระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ทั้งนี้ซัลไฟด์มักเกิดขึ้นจากการรีดักชันของซัลเฟตและสารประกอบอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ รวมถึงเกิดจากการย่อยสลายของสารประกอบที่อุดมไปด้วยโปรตีน ซึ่งเมื่อซัลเฟตถูกรีดิวซ์จะทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ดังสมการที่ 20 และเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายในน้ำ จะเกิดการแตกตัวดังสมการที่ 21 และสมการที่ 22 (de Lemos Chernicharo, 2007)



ทั้งนี้การแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำเป็นไอออนต่าง ๆ ดังสมการที่ 16 และสมการที่ 17 มักขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าพีเอชภายในระบบ (ภาพที่ 2.6) สำหรับการยับยั้งการทำงานของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งเกิดขึ้นจากซัลไฟด์นั้น จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์รูปที่ไม่แตกตัวที่มีอยู่ในระบบ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า การยับยั้งซึ่งเกิดขึ้นจากซัลไฟด์นั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอชเป็นสำคัญ ซึ่งตามปกติช่วงค่าพีเอชของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมักอยู่ระหว่าง 6.5 – 8 และจากภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 7 ซัลไฟด์ปริมาณร้อยละ 50 จะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัว ซึ่งเป็นรูปที่มีความเป็นพิษสูงที่สุด และอีกร้อยละ 50 จะอยู่ในรูปไบซัลไฟด์ไอออน ซึ่งเป็นรูปที่มีความเป็นพิษต่ำกว่า นอกจากนี้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังสามารถอยู่ในเฟสของก๊าซ (H_2S_{gas}) หรือละลายอยู่ในเฟสของเหลว (H_2S_{liq}) ได้อีกด้วย ทั้งนี้ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสของก๊าซจะมีมากหรือน้อยนั้น ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดขึ้นของก๊าซมีเทนเป็นสำคัญ หากในระบบมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นมาก ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสของก๊าซก็จะเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากเช่นกัน โดยเกิดจากการที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสของเหลวเคลื่อนที่ไปสู่เฟสของก๊าซมากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของซีโอดีในระบบก็เพิ่มสูงขึ้น (การผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้น) ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาความเป็นพิษของซัลไฟด์ในระบบการย่อยสลาย จึงได้มีการกำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต (COD/SO_4^{2-} ratio) ในวัสดุตั้งต้นไว้ โดยควรมีค่าเท่ากับ 10 (de Lemos Chernicharo, 2007)

ในทางปฏิบัติ จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่ควรต้องมีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของวัสดุตั้งต้นต่อซัลไฟด์ ทั้งนี้ปริมาณของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญเหล่านี้ ได้แก่ อัตราส่วนของซีโอดีต่อซัลเฟตในวัสดุตั้งต้น (หากอัตราส่วนมีค่าต่ำ จะทำให้ปริมาณซัลไฟด์ในระบบเพิ่มสูงขึ้น) องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้น พีเอชและอุณหภูมิภายในระบบ และการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการรีดิวซ์ซัลเฟตและอาร์เคียที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (de Lemos Chernicharo, 2007)

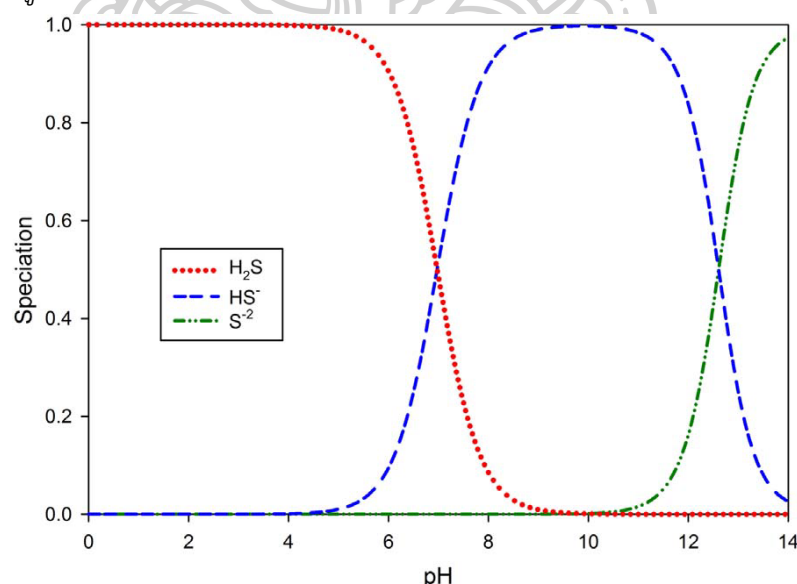
ในการออกแบบและการควบคุมการดำเนินงานระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ ความเข้มข้นสูงสุดของไฮโดรเจนซัลไฟด์รูปที่ไม่แตกตัวที่ยอมให้มีได้ในระบบ สำหรับถังหมักที่มีอัตราการกำจัดสูง เช่น ยูเอเอสบี (UASB) และถังกรองไร้อากาศแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic filter) เป็นต้น สามารถทนทานต่อปริมาณของซัลไฟด์ในระดับที่สูงกว่าได้ โดยมีความทนทานได้สูงถึง 170 มิลลิกรัมไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลิตร ทั้งนี้ซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีความเป็นพิษที่สูงมากหากในระบบมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในระดับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถังหมักที่มีอัตราการกำจัดสูงดังกล่าวก็สามารถทนทานต่อความ

เข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับนี้ได้ หากระบบมีการดำเนินงานแบบต่อเนื่อง และวัสดุตั้งต้นได้ผ่านการปรับปรุงสภาพบางอย่างมาแล้ว (de Lemos Chernicharo, 2007)

อย่างไรก็ตาม หากความเข้มข้นของซัลไฟด์ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีค่าสูงเกินกว่าระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ ก็จำเป็นต้องมีการดำเนินการตามมาตรการต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อให้ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศยังสามารถดำเนินงานไปได้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ (1) ยกกระตือรือร้นค่าพีเอชในระบบให้สูงขึ้น เพื่อส่งเสริมให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสของเหลวเกิดการแตกตัวไปอยู่ในรูปของไบซัลไฟด์ไอออน ซึ่งจากภาพที่ 6 จะเห็นว่า เมื่อพีเอชของระบบมีค่าเท่ากับ 8 จะมีซัลไฟด์เพียงร้อยละ 10 เท่านั้นที่ปรากฏอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัว (2) เจือจางน้ำเสียหรือลดการป้อนวัสดุอินทรีย์ตั้งต้น เพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในระบบ (3) ตกตะกอนซัลไฟด์ด้วยเกลือของเหล็ก และ (4) เพิ่มอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อซัลเฟต เพื่อส่งเสริมให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเฟสของเหลวเคลื่อนที่ไปสู่เฟสของก๊าซมากขึ้น (de Lemos Chernicharo, 2007)

ภาพที่ 2.6

สัดส่วนปริมาณสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไบซัลไฟด์ไอออนและซัลไฟด์ไอออน ที่พีเอชระดับต่าง ๆ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Application of membrane contactors to remove hydrogen sulfide from sour water,” โดย J. Minier-Matar, A. Janson, A. Hussain, and S. Adham, 2017, *Journal of Membrane Science*, น. 382. ปีลิขสิทธิ์ 2017 โดย Journal of Membrane Science.

4) ความเป็นพิษจากโลหะ (Toxicity by metals)

สารประกอบและธาตุพิษ เช่น โครเมียม (Chromium) โครเมต (Chromates) นิกเกิล (Nickel) สังกะสี (Zinc) ทองแดง (Copper) สารหนู (Arsenic) และไซยาไนด์ (Cyanides) จัดเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารอนินทรีย์อื่น ๆ ทั้งนี้โดยเฉพาะทองแดง สังกะสี และนิกเกิลที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ แม้เพียงความเข้มข้นในระดับต่ำ ก็มีความเป็นพิษที่ค่อนข้างสูง (de Lemos Chernicharo, 2007)

สำหรับความเข้มข้นของโลหะที่เป็นพิษส่วนใหญ่ที่ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศสามารถรองรับไว้ได้นั้นมักมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งซัลไฟด์จะทำหน้าที่ไปจับกับโลหะเพื่อให้อยู่ในรูปเกลือของซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำ ทั้งนี้ตัวของซัลไฟด์เองนั้น จัดเป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษสูงมากกับระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ แต่เมื่อถูกจับอยู่กับโลหะ ก็จะอยู่ในรูปของเกลือที่ไม่ละลายน้ำ จึงไม่มีผลกระทบต่อระบบแต่อย่างใด (de Lemos Chernicharo, 2007)

การเติมซัลไฟด์ในปริมาณที่เพียงพอลงไปในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ เพื่อตกตะกอนโลหะจัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งในการควบคุมความเป็นพิษของโลหะ โดยทั่วไปนิยมเติมซัลไฟด์ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อตกตะกอนโลหะซึ่งมีความเข้มข้นโดยประมาณอยู่ระหว่าง 1.8 – 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยโลหะจะตกตะกอนกับซัลไฟด์อยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ (Metallic sulfide) วิธีการดังกล่าวจัดเป็นวิธีทางเลือกที่ดีในการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนโลหะ อย่างไรก็ตาม หากอัตราส่วนข้างต้น (1 มิลลิกรัมซัลไฟด์ต่อลิตร : 2 มิลลิกรัมโลหะต่อลิตร) ไม่สามารถควบคุมความเป็นพิษของโลหะในขณะบำบัดได้ ก็สามารถเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide) หรือ เกลือของซัลเฟต (Sulfate salt) เพิ่มลงไปได้ (de Lemos Chernicharo, 2007)

2.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ มีลักษณะเป็นก๊าซผสม ประกอบด้วยก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) เป็นส่วนใหญ่ และมีปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen, N₂) ไฮโดรเจน (Hydrogen, H₂) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H₂S) แอมโมเนีย (Ammonia, NH₃) ออกซิเจน (Oxygen, O₂) น้ำ (Water, H₂O) และไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (เช่น อีเทน (Ethane) และโพรเพน (Propane)) เพียงเล็กน้อย (Baciocchi et al., 2013; Bioenergie, 2019; James, 2008; Mursec et al., 2009; Surendra et al., 2014) สำหรับองค์ประกอบและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4

องค์ประกอบและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ความเข้มข้นโดยปริมาตร (ร้อยละ)
มีเทน (CH ₄)	40 – 75
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	15 – 60
น้ำ (H ₂ O)	1 – 5
ไนโตรเจน (N ₂)	0 – 5
ไฮโดรเจน (H ₂)	น้อยมาก
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	0 – 0.5
ออกซิเจน (O ₂)	<2
ก๊าซอื่น ๆ ที่พบเป็นปริมาณน้อย (Trace gases)	<2
แอมโมเนีย (NH ₃)	0 – 0.05

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion,” โดย B. Bharathirajaa, T.

Sudharsanaa, J. Jayamuthunagaib, R. Praveenkumarc, S. Chozhavendhand, and J. Iyyappana, 2018, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, น. 571. ปีลิขสิทธิ์ 2018 โดย Elsevier Science.

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยมากมักผันแปรไปตามชนิดและความสามารถในการย่อยสลายได้ของวัสดุตั้งต้น (ตารางที่ 2.5) นอกจากนี้องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพก็ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น ความเป็นกรดเป็นด่าง อุณหภูมิของการย่อยสลาย ชนิดของจุลินทรีย์ ระยะเวลาในการย่อยสลาย และ จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลาย เป็นต้น (Dobre et al., 2014; Monnet, 2003) อย่างไรก็ตาม มีเทนยังคงเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในก๊าซชีวภาพเสมอ (ตารางที่ 2.5)

ตารางที่ 2.5

สัดส่วนของก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของสารอินทรีย์ตั้งต้นชนิดต่าง ๆ

ชนิดของสารอินทรีย์ตั้งต้น	สัดส่วนของก๊าซมีเทน (ร้อยละ)
มูลวัว (Cow manure)	50 – 60
มูลสุกร (Pig manure)	60
ของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ปีก (Poultry waste)	68
มูลแกะ (Sheep dung)	65
มูลม้า (Horse dung)	66
หญ้า (Grass)	84
ฟางข้าวสาลี (Wheat straw)	78.5
ใบไม้แห้ง (Dry leaves)	58
ฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley straw)	77
ใบบีทรูท (Beet leaves)	84.8
ซังข้าวโพด (Corn stover)	83.1

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Biogas Production Potential from Waste in Timis County,” โดย T. Vintila, S. Neo, and C. Vintilă, 2012, *Animal Science and Biotechnology*, 45(1), น. 369. ปีลิขสิทธิ์ 2012 โดย Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies.

2.4 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม (Anaerobic co-digestion, AcoD) เป็นเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อาศัยการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีการผสมเป็นเนื้อเดียวกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ทั้งนี้แต่เดิมการผลิตก๊าซชีวภาพมักนิยมใช้สารอินทรีย์เพียงชนิดเดียวในกระบวนการผลิต แต่เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการตระหนักว่า การย่อยสลายอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ที่มีการใช้สารอินทรีย์หลากหลายชนิดผสมผสานกัน ทำให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion, AD) มีประสิทธิภาพดีขึ้นจากการเติมสารอินทรีย์ชนิดที่สองซึ่งทำหน้าที่ให้สารอาหารแก่สารอินทรีย์ชนิดแรกซึ่งขาดแคลนสารอาหาร จึงช่วยในการปรับปรุงพารามิเตอร์ทางเคมีกายภาพที่ควบคุมกระบวนการให้ดีขึ้น (Park & Li, 2012) ทั้งนี้การหมักร่วมเป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตของการกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเนื่องจากมีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น ช่วยในการกำจัดสารประกอบที่เป็นพิษ ช่วยในการเพิ่มภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ช่วยให้เกิดความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์จากการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ร่วมกัน ช่วยปรับสมดุล

ของสารอาหารจากการปรับแต่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ก๊าซชีวภาพ และช่วยให้เกิดการดำเนินงานร่วมกันของจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายได้เป็นอย่างดี (Kwietniewska & Tys, 2014)

การหมักร่วมเป็นเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งช่วยปรับแต่งอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนของ สารอินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม จึงส่งผลให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณมากขึ้น (Abouelenien et al., 2016) ทั้งนี้การหมักร่วมทำให้การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบการย่อยสลายมี ความเสถียรสูงขึ้น ช่วยปรับปรุงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนโดยการลดความเข้มข้นของไนโตรเจน ลง จึงช่วยลดปัญหาจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและแอมโมเนียให้น้อยลง (Khalid et al., 2011) นอกจากนี้การนำสารอินทรีย์มาผสมรวมกันในกระบวนการหมักร่วมยังช่วยให้สังคมจุลินทรีย์ ได้รับสารอาหารจำเป็นตามความต้องการอย่างครบถ้วน ซึ่งช่วยส่งเสริมการดำเนินกิจกรรมการย่อย สลายของจุลินทรีย์ จึงทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อไม่นานมานี้มีรายงานการ วิจัยจำนวนหนึ่งที่ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้กระบวนการย่อยสลายโดยการหมักร่วม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Ye et al. (2013) ดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักฟางข้าวร่วมกับเศษอาหารและ มูลสุกร (Co-digestion) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของวัสดุตั้งต้นดังกล่าวต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีการใช้รูปแบบการหมักเป็นแบบขั้นตอนเดียวและดำเนินการทดลองเป็นแบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และใช้วัสดุตั้งต้นมีความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 54 กรัมต่อลิตร ผลการศึกษา พบว่า การหมักฟางข้าวร่วมกับเศษอาหารและมูลสุกร ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ก๊าซชีวภาพ โดยให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 55.2 71.6 และ 46.6 สำหรับอัตราส่วนผสม ของวัสดุตั้งต้นระหว่าง เศษอาหาร : มูลสุกร : ฟางข้าว เท่ากับ 0:2:1 0.4:1.6:1 และ 0.8:1.2:1 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับหมักโดยใช้ฟางข้าวเพียงอย่างเดียว

Aichinger et al. (2015) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ ห้องปฏิบัติการโดยอาศัยการหมักร่วมระหว่างมูลฝอยชุมชนกับกากตะกอนผสมที่ผ่านการบำบัด เบื้องต้นด้วยความร้อน (กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 และกากตะกอนจากการบำบัดน้ำ เสียขั้นที่ 2) ที่อุณหภูมิปานกลาง ผลการศึกษาพบว่า การหมักร่วมระหว่างมูลฝอยชุมชนกับกาก ตะกอนผสม แม้วามีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงกว่าร้อยละ 25 แต่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่า ร้อยละ 35 เมื่อเปรียบเทียบกับหมักกากตะกอนผสมที่ไม่มีการเติมมูลฝอยชุมชน

Momoh and Nwaogazie (2010) ศึกษาผลของเศษกระดาษต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดย การหมักร่วมระหว่างมูลวัวและผักตบชวาที่มีอัตราส่วนคงที่ ณ อุณหภูมิห้อง และดำเนินการทดลองใน รูปแบบแบตช์ เป็นระยะเวลา 60 วัน โดยมีการเติมเศษกระดาษปริมาณต่าง ๆ ลงไปในส่วนผสมของ มูลวัวและผักตบชวาที่มีอัตราส่วนคงที่ เพื่อศึกษาปริมาณกระดาษที่สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพได้

สูงสุด ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.11 ลิตร เกิดขึ้นจากการเติม เศษกระดาษปริมาณ 17.5 กรัม ผสมรวมกับมูลวัว 5 กรัม และผักตบชวา 5 กรัม ซึ่งทำให้ระบบการย่อยสลายมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 10 ในของผสมปริมาตรเท่ากับ 250 มิลลิลิตร

Macias-Corral et al. (2008) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของมูลวัว ขยะอินทรีย์ และกากฝ้ายในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอนระดับต้นแบบ โดยมูลวัว และขยะอินทรีย์ได้ถูกนำไปย่อยสลายทั้งในลักษณะที่เป็นวัสดุตั้งต้นชนิดเดียวและนำไปย่อยสลายในลักษณะผสมรวมกัน ผลการศึกษาพบว่า การย่อยสลายในลักษณะที่เป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวของมูลวัวให้ผลผลิตมีเทนเท่ากับ 62 ลูกบาศก์เมตรต่อตันมูลวัวแห้ง และของขยะอินทรีย์ให้ผลผลิตมีเทนเท่ากับ 37 ลูกบาศก์เมตรต่อตันขยะอินทรีย์แห้ง ส่วนการย่อยสลายในลักษณะที่เป็นการหมักร่วมของขยะอินทรีย์ผสมกับมูลวัวให้ผลผลิตมีเทนเท่ากับ 172 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของเสียแห้ง และของกากฝ้ายผสมกับขยะอินทรีย์ให้ผลผลิตมีเทนเท่ากับ 87 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของเสียแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายในลักษณะที่เป็นวัสดุตั้งต้นชนิดเดียวกับการย่อยสลายในลักษณะของการหมักร่วมพบว่า การหมักร่วมให้ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การหมักร่วมระหว่างขยะอินทรีย์และมูลวัวมีผลเสริมฤทธิ์กัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาณที่สูงกว่า จึงทำให้วัสดุคงเหลือที่ย่อยสลายแล้วมีน้ำหนักและปริมาตรน้อยกว่า

2.5 วัสดุตั้งต้นสำหรับการหมักร่วม

ชีวมวลทุกชนิดซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) โปรตีน (Proteins) ไขมัน (Lipids) เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) จัดเป็นชีวมวลที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทฤษฎีปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์นั้น ทั้งนี้ไขมันจัดเป็นองค์ประกอบที่สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุด แต่จะใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน เนื่องจากมีความสามารถในการย่อยสลายได้ค่อนข้างต่ำ ส่วนคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนแม้ว่าจะสามารถเกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่า แต่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่า (Esposito, Frunzo, Giordano, et al., 2012)

ไขมัน เช่น น้ำมันและไขชั้น มักพบเป็นองค์ประกอบในเศษอาหาร น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงฆ่าสัตว์ อุตสาหกรรมนมและผลิตภัณฑ์นม อุตสาหกรรมน้ำมันพืช เป็นต้น เนื่องจากไขมันมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลเป็นจำนวนมาก จึงมีศักยภาพในการให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูง ด้วยเหตุนี้จึงได้รับความสนใจในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ไขมันสามารถก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบการย่อยสลายได้ กล่าวคือ ก่อให้เกิดการ

ยับยั้งการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน และเกิดการถูกดูดซับอยู่บนตะกอนจุลินทรีย์ ส่งผลให้ตะกอนจุลินทรีย์เกิดการลอยตัวและเกิดการหลุดลอยออกไปจากระบบได้ (Li et al., 2002; Neves et al., 2009)

คาร์โบไฮเดรตจัดเป็นองค์ประกอบหลักของสารอินทรีย์ซึ่งมีที่มาจากอุตสาหกรรมเกษตร เศษอาหาร และของเสียส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จากขยะชุมชนซึ่งมีแหล่งที่มาจากบ้านเรือนและตลาด ทั้งนี้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของของเสียเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับอัตราในการสร้างกรดและอัตราการสร้างมีเทน ทั้งนี้หากการสร้างกรดเกิดขึ้นในอัตราที่เร็วกว่าการสร้างมีเทน ก็จะก่อให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าพีเอช ซึ่งจะไปยังยับยั้งการทำงานของอาร์เคียซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (Siegert & Banks, 2005)

สำหรับสารอินทรีย์ที่อุดมด้วยโปรตีน ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนสูง มักพบอยู่ในของเสียอินทรีย์จากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์ โรงฆ่าสัตว์ และฟาร์มปศุสัตว์ (มูลเหลวและมูลแห้ง) ของเสียเหล่านี้มักมีปริมาณสารอินทรีย์และปริมาณความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีค่อนข้างสูง แต่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ในมูลสัตว์ยังพบมีปริมาณแอมโมเนียอยู่สูง ทั้งนี้แอมโมเนียจัดเป็นสารยับยั้งในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งพบเป็นปัญหาสำคัญในระบบที่มีการบ้อนของเสียซึ่งอุดมด้วยโปรตีน เนื่องจากในขณะที่เกิดการย่อยสลาย จะส่งผลให้แอมโมเนียในระบบมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น (Callaghan et al., 2002; Chen et al., 2008; Cuetos et al., 2010; Edström et al., 2003; Nielsen & Angelidaki, 2008)

สำหรับในกระบวนการหมักร่วม ของเสียที่อุดมด้วยโปรตีนจะส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูงและมีสารอาหารสูง ส่วนของเสียที่อุดมด้วยคาร์บอนก็จะช่วยปรับสมดุลอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนของวัสดุตั้งต้นชนิดต่าง ๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ จึงช่วยลดความเสี่ยงในการยับยั้งซึ่งเป็นผลมาจากแอมโมเนีย ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการแนะนำให้มีการใช้การหมักร่วมกันระหว่างของเสียอินทรีย์จากชุมชนกับของเสียที่มีอุดมด้วยปริมาณไนโตรเจน หรือการใช้การหมักร่วมกันระหว่างมูลสัตว์กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งส่งผลให้เกิดผลผลิตก๊าซมีเทนในระดับที่สูงขึ้น (Buendía et al., 2009; Hashimoto, 1986; Hills & Roberts, 1981; Lehtomäki et al., 2007)

ส่วนวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นพืชพลังงาน จะมีลักษณะแตกต่างจากวัสดุตั้งต้นที่ได้กล่าวมา เนื่องจากไม่ใช่ของเสีย แต่เป็นพืชที่ปลูกขึ้นมาด้วยวัตถุประสงค์เฉพาะในการผลิตพลังงาน และสามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณมาก แม้ว่าจะนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ตารางที่ 2.6)

ตารางที่ 2.6

ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของพืชพลังงานชนิดต่าง ๆ

ชนิดของพืชพลังงาน	ผลผลิตก๊าซชีวภาพ (ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อตันของแข็งระเหย)	สัดส่วนของมีเทน (ร้อยละ)
ซูการ์บีท	730 – 770	53
หัวบีทอาหารสัตว์	750 – 800	53
ข้าวโพด	560 – 650	52
ซังข้าวโพด	660 – 680	53
ข้าวสาลี	650 – 700	54
ข้าวทริคเคลี	590 – 620	54
ข้าวฟ่าง	520 – 580	55
หญ้า	530 – 600	54
เรด โคลเวอร์	530 – 620	56
ทานตะวัน	420 – 540	55
เมล็ดข้าวสาลี	700 – 750	53
เมล็ดข้าวไรย์	560 – 780	53

ปรับปรุงจาก “Anaerobic co-digestion of organic wastes,” โดย G. Esposito, L. Frunzo, A. Giordano, F. Liotta, A. Panico, and F. Pirozzi, 2012, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 11, น. 328. ปีลิขสิทธิ์ 2012 โดย *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*.

สำหรับผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายโดยใช้การหมักร่วมของวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นส่วนผสมของสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.7 ทั้งนี้ในการเปรียบเทียบผลการศึกษาต่าง ๆ ดังกล่าว จำเป็นต้องคำนึงปัจจัยที่แตกต่างกันในการดำเนินการทดลองด้วย เช่น ปริมาตร อุณหภูมิ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ระยะเวลาการกักเก็บ รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ (แบบแบตช์ แบบท่อไหล แบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์) ปริมาณความชื้น อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น ฯลฯ

ทั้งนี้ในกระบวนการหมักร่วม ของเสียที่อุดมด้วยโปรตีนจะส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูงและมีสารอาหารสูง ส่วนของเสียที่อุดมด้วยคาร์บอนก็จะช่วยปรับสมดุลอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนของวัสดุตั้งต้นชนิดต่าง ๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ จึงช่วยลดความเสี่ยงในการยับยั้งซึ่งเป็นผลมาจากแอมโมเนีย ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการแนะนำให้มี

การใช้การหมักร่วมกันระหว่างของเสียอินทรีย์จากชุมชนกับของเสียที่มีอุณหภูมิประมาณไนโตรเจน หรือการใช้การหมักร่วมกันระหว่างมูลสัตว์กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งส่งผลให้เกิดผลผลิตก๊าซ มีเทนในระดับที่สูงขึ้น (Buendia et al., 2009; Hashimoto, 1986; Hills & Roberts, 1981; Lehtomäki et al., 2007)

สำหรับชีวมวลที่นิยมนำมาใช้ในการหมักร่วมเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและปรับปรุง กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศให้มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้มักเป็นวัสดุจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ มูลสัตว์ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ของเสียอินทรีย์จากอุตสาหกรรมแปรรูปสินค้าเกษตรทั้งพืชและสัตว์ ของเสียจากฟาร์ม ปศุสัตว์ เศษอาหาร ของเสียอินทรีย์จากชุมชน และพืชพลังงาน เป็นต้น

2.5.1 เศษอาหาร

โดยทั่วไป เศษอาหารมักเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น โรงแรม ร้านอาหาร ภัตตาคาร คริวเรือน และร้านอาหารของสถาบันต่าง ๆ เป็นต้น และจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ตลอดจนการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ได้ส่งผลให้เศษอาหารมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และได้กลายเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในมูลฝอยชุมชน ซึ่งในการศึกษาของ Zhang et al. (2014) มีการรายงานว่า เศษอาหารมีปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 18.1 – 30.9 และร้อยละ 17.1 – 26.35 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เศษอาหารมีความชื้นสูง ด้วยเหตุนี้เศษอาหารจึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้โดยง่าย และเมื่อเปรียบเทียบวิธีการกำจัดและบำบัดเศษอาหารด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การกำจัดในหลุมฝังกลบ การเผาในเตาเผา การนำไปหมักทำปุ๋ยด้วยกระบวนการใช้อากาศ และการแปรรูปให้มีมูลค่าทางพลังงาน นั้น จะเห็นได้ว่า การแปรรูปเศษอาหารด้วยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจัดเป็นวิธีการจัดการกับปัญหาเศษอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากลักษณะของสารอินทรีย์ในเศษอาหารมีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ อย่างไรก็ตาม ในระหว่างการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้อากาศ มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องให้ความสำคัญ เช่น อุณหภูมิ กรดไขมันระเหยง่าย พีเอช อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน แอมโมเนีย กรดไขมันโซ่ยาว และโลหะหนัก เป็นต้น และเนื่องจากเศษอาหารมักประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นพอลิเมอร์ และโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ และมักอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง จึงควรมีการบำบัดเศษอาหารในเบื้องต้นก่อนนำเข้าสู่ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ แม้ว่า เศษอาหารจะเป็นสารอินทรีย์ที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตก๊าซมีเทน แต่การใช้สารอาหารเป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวในระบบมักทำให้มีการยับยั้งเกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายอยู่เสมอ เนื่องจาก สารอาหารในระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุล สำหรับปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการยับยั้ง มักประกอบด้วย

ตารางที่ 2.7

ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายโดยใช้การหมักในระบบระหว่างสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

วัสดุตั้งต้น	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			เอกสารอ้างอิง
	อัตราส่วน	ปริมาณ (ลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
มูลสุกรกับเศษมันฝรั่ง*	85:15	3.5	35 ± 1	Kaparaju et al. (2002)
	80:20	3.5	35 ± 1	
มูลโคกับกากอ้อยพีช*	50:50	0.3	35	210 – 240
	25:75	0.3	35	300 – 330
	10:90	0.3	35	70
มูลโคกับเศษผักและผลไม้**	80:20	18	35 ± 0.5	Hashimoto (1983)
	70:30	18	35 ± 0.5	
	60:40	18	35 ± 0.5	380
	50:50	18	35 ± 0.5	450
มูลโคกับฟางข้าวไร่เลย***	80:20	100	35	160
มูลโคนมกับชีสเวย์*	75:25	0.25	35 ± 1	Hills (1980)
	90:10	0.25	35 ± 1	252.4
	75:25	0.25	35 ± 1	237.6
มูลโคนมกับมันฝรั่ง*	75:25	0.25	35 ± 1	227.7
มูลโคนมกับพาสต้าแบบธรรมดา*	75:25	0.25	35 ± 1	353.5
	90:10	0.25	35 ± 1	224.0
มูลโคนมกับหญ้าสด*	75:25	0.25	35 ± 1	207.8
มูลโคนมกับน้ำมันที่ใช้แล้ว*	75:25	0.25	35 ± 1	360.6
มูลโคนมกับเศษซากอินทรีย์กับน้ำมันพืช****	83:17	1	37	699 ± 6
มูลโคนมกับเศษซากอินทรีย์กับน้ำมันสัตว์****	83:17	1	37	508 ± 16
มูลโคนมกับเศษซากอินทรีย์กับเชลลูโลส****	83:17	1	37	254 ± 10
มูลโคนมกับเศษซากอินทรีย์กับโปรตีน****	83:17	1	37	288 ± 7

หมายเหตุ: * คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแข็งระเหย ** คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนัก *** คือ อัตราส่วนโดยปริมาตร และ **** คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักแห้ง

สารอาหารรองหรือโลหะปริมาณน้อยมีไม่เพียงพอ สารอาหารหลักมีปริมาณมากเกินไป (El-Mashad & Zhang, 2010; Zhang et al., 2013) อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่เหมาะสม และมีความเข้มข้นของไขมันในระดับสูง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ จึงมีการพัฒนารูปแบบการย่อยสลายที่เรียกว่า การหมักร่วม (Co-digestion) ขึ้น ในปัจจุบันการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารกับสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ จัดเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมแพร่หลายและประสบความสำเร็จด้วยดี ทั้งนี้มีรายงานการวิจัยจำนวนหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงเทคนิคต่าง ๆ ที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพที่ดี ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Viturtia et al. (1989) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของเศษผักและผลไม้ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ผลการศึกษาพบว่า ของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 95.1 เกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยให้เป็นผลผลิตมีเทนเท่ากับ 530 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย

ในการศึกษาของ Lee et al. (1999) ซึ่งดำเนินการย่อยสลายเศษอาหารเพื่อผลิตก๊าซมีเทนในถังหมักแบบต่อเนื่องขนาด 5 ลิตร พบว่า ของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 70 เกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยให้เป็นผลผลิตมีเทนเท่ากับ 440 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย

Gunaseelan (2004) ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศของเศษอาหารชนิดต่าง ๆ จำนวน 54 ชนิด พบว่า ให้ผลผลิตมีเทนมีค่าอยู่ระหว่าง 180 – 732 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ทั้งนี้ความผันแปรของผลผลิตมีเทนดังกล่าวเป็นผลสืบเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดหรือแหล่งที่มาของเศษอาหารที่แตกต่างกัน

Cho et al. (1995) รายงานว่า เศษอาหารของชาวเกาหลีให้ผลผลิตมีเทนเท่ากับ 472 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย และเศษอาหารดังกล่าวมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพถึงร้อยละ 86

Yong et al. (2015) รายงานว่า เศษอาหารจากโรงอาหารผสมกับฟางในอัตราส่วน 5:1 ให้ผลผลิตมีเทนเท่ากับ 0.392 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย

Zhang et al. (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความผันแปรขององค์ประกอบของเศษอาหารซึ่งนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยทำการเก็บรวบรวมเศษอาหารจากเมืองซานฟรานซิสโก มลรัฐแคลิฟอร์เนีย มาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลาย และมีการศึกษาความผันแปรขององค์ประกอบของเศษอาหารรายวันและรายสัปดาห์เป็นระยะเวลา 2 เดือน รวมทั้งมีการประเมินความสามารถในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของเศษอาหารและประเมินผลผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน ซึ่งใช้ระบบการย่อยสลายแบบแบตช์ และดำเนินการที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยรายวันของปริมาณความชื้นและอัตราส่วนระหว่างของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งทั้งหมด ซึ่งได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างตลอดระยะเวลา

1 สับดาห์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 70 และ ร้อยละ 83 ตามลำดับ ขณะที่ค่าเฉลี่ยรายสับดาห์ มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 74 และ ร้อยละ 87 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารแสดงให้เห็นว่า สารอาหารในเศษอาหารมีความสมดุลอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลผลิตมีเทนมีค่าเท่ากับ 348 และ 435 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย หลังจากเกิดการย่อยสลายเป็นระยะเวลา 10 และ 28 วัน ตามลำดับ สำหรับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 73 และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการย่อยสลาย (28 วัน) มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายถูกทำลายโดยเฉลี่ยร้อยละ 81 จากผลการศึกษาต่าง ๆ ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า เศษอาหารจัดเป็นวัสดุตั้งต้นชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ เนื่องจากมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพสูงและให้ผลผลิตมีเทนสูง

2.5.2 ผลผลิตก๊าซชีวภาพบรรจุอาหาร

ผลผลิตก๊าซชีวภาพบรรจุอาหารเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นกระดาศสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์และภาชนะใส่อาหารและเครื่องดื่ม มีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส ส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาจากอุตสาหกรรมกระดาษ นอกจากนี้ก็อาจพบเป็นองค์ประกอบอยู่ในมูลฝอยชุมชนได้ หากไม่ได้ถูกคัดแยกออกไป ณ แหล่งกำเนิด เซลลูโลสมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูง โดยมีค่าตั้งแต่ 173:1 ไปจนถึงมากกว่า 1,000:1 ในขณะที่อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 20:1 – 30:1 (Hawkes, 1980; Zhang et al., 2008)

2.6 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

การพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานชีวมวลเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบศักยภาพของวัสดุตั้งต้นเพื่อเลือกวัสดุตั้งต้นที่มีศักยภาพสูงไปใช้ในกระบวนการหรือเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญในการประเมินการออกแบบระบบ การศึกษาความคุ้มทุน และการจัดการต่าง ๆ สำหรับการเดินระบบเพื่อผลิตก๊าซมีเทนอย่างเต็มรูปแบบ (Angelidaki et al., 2009; Esposito, Frunzo, Liotta, et al., 2012)

โดยทั่วไปการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical methane potential, BMP) เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณผลผลิตก๊าซมีเทนที่เป็นไปได้ของวัสดุตั้งต้น นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงความสามารถและอัตราการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของวัสดุตั้งต้น อีกทั้งยังสามารถประเมินเบื้องต้นได้อย่างคร่าว ๆ ถึงการเกิดองค์ประกอบที่ยับยั้งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยเช่นกัน (Drosig et al., 2013)

การทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งมักทำการทดลองในภาชนะปิดที่มีขนาด 100 – 2,000 มิลลิลิตร (Angelidaki et al., 2009) โดยผสมวัสดุตั้งต้นที่ต้องการ

ทดสอบกับหัวเชื้อจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ และบ่มวัสดุผสมในสภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิคงที่ ทำการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการบ่ม (Hansen et al., 2004) ซึ่งสามารถวัดปริมาณก๊าซมีเทนได้โดยวิธีต่าง ๆ เช่น วัดโดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ (Water replacement method) วัดจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไป (Manometric method) หรือวัดโดยใช้เทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph) (Esposito, Frunzo, Liotta, et al., 2012) จนกระทั่งพิจารณาแล้วว่าวัสดุตั้งต้นย่อยสลายอย่างสมบูรณ์หรือมีปริมาณก๊าซที่ผลิตขึ้นต่อวันน้อยกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด และควรมีการทำชุดควบคุม (Control) โดยทำเช่นเดียวกับชุดทดลอง (Substrate) แต่ไม่มีการเติมวัสดุตั้งต้น เพื่อหาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว (Drosg et al., 2013)

นอกจากนี้ชุดการทดลองของวัสดุตั้งต้นแต่ละชนิดควรมีการทำซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ ซึ่งพิจารณาจากความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ หากวัสดุตั้งต้นที่ใช้มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง (Heterogeneity) ควรมีการทำซ้ำมากกว่า 3 ซ้ำ เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สำหรับวัสดุตั้งต้นที่ยังไม่ทราบลักษณะการย่อยสลาย ต้องทำการเจือจางวัสดุตั้งต้นด้วยน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยควรทำการเจือจางวัสดุตั้งต้นให้มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 5 จนถึงร้อยละ 100 (ไม่มีการเจือจาง) หลังจากนั้นจึงนำไปทำการทดลองเพื่อป้องกันการปนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไป (Overload) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดการยับยั้งจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ และส่งผลให้การประเมินศักยภาพของวัสดุตั้งต้นผิดพลาดได้มากที่สุด โดยประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุตั้งต้นต่ำกว่าความเป็นจริง (Underestimated) สำหรับความเข้มข้นของวัสดุตั้งต้นที่เหมาะสม พิจารณาจากค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดที่มีค่าใกล้เคียงกันอย่างน้อย 2 ความเข้มข้นจากความเข้มข้นทั้งหมดที่ทำการเจือจาง แต่ถ้าค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเจือจางที่มากขึ้น (ความเข้มข้นของวัสดุหมักลดลง) ก็จำเป็นต้องทำการเจือจางเพิ่มโดยลดความเข้มข้นของวัสดุหมักนั้นลง (Angelidaki et al., 2009)

การคำนวณค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจะพิจารณาจากปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตขึ้นต่อน้ำหนักของวัสดุตั้งต้น โดยรายงานเป็นปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย หรือปริมาณก๊าซมีเทนต่อซีไอดี หรือปริมาณก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักวัสดุตั้งต้น ที่สภาวะมาตรฐานคือที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ (Angelidaki et al., 2009; Chandra et al., 2012; Drosg et al., 2013; Hansen et al., 2004)

2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนประกอบด้วยหลายปัจจัย และปัจจัยดังกล่าวอาจนำไปสู่ผลการศึกษาที่ไม่ถูกต้อง และไม่สามารถนำผลการศึกษาไปเปรียบเทียบกับ

การศึกษาอื่น ๆ ได้ โดยการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมีแนวทางและมาตรฐานต่าง ๆ มากมาย เช่น International organization for standardization (ISO) American society for testing and materials (ASTM) และ German standard (VDI) เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในปัจจุบันเป็นวิธีการที่ได้มาจากแนวทางและมาตรฐานเหล่านี้ แต่วิธีการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแต่ละวิธีก็มีความแตกต่างกันในเรื่องของสภาวะการทดลอง วิธีการทดลอง การวิเคราะห์และการนำเสนอข้อมูล ซึ่งส่งผลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและนำไปสู่การผันแปรของผลการทดสอบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเทียบมาตรฐานการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยคำนึงถึงขั้นตอน วิธีการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูล และการนำเสนอข้อมูล เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือและสามารถเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่นได้ (Wang, 2016) สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ประกอบด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1) สภาวะการทดลอง

ผลของการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลองต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อม (เช่น ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ เป็นต้น) หัวเชื้อจุลินทรีย์ อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น ความเข้มข้นของวัสดุตั้งต้น องค์ประกอบของก๊าซที่ใช้แทนที่ช่องว่างเหนือตัวอย่าง และการกวนผสม เป็นต้น (Wang, 2016)

สำหรับตัวอย่างรายละเอียดของสภาวะการทดลองที่ส่งผลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เช่น อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นสภาวะการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของจุลินทรีย์และวัสดุตั้งต้น หากอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นมีค่าสูงมักจะเกิดกระบวนการย่อยสลายอย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ แต่อาจให้ผลการศึกษาที่ไม่แน่นอน เช่น อาจมีปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากวัสดุตั้งต้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ ในทางตรงกันข้าม หากอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นมีค่าต่ำจะทำให้ได้ผลการศึกษาที่ชัดเจน แต่อาจเกิดการยับยั้งในระหว่างกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเนื่องจากการสะสมของผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Maya-Altamira et al., 2008)

2) วิธีการทดลองและความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น

โดยทั่วไปวิธีการทดลองที่นำมาใช้ในการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแต่ละวิธีมักมีข้อกำหนดต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน เช่น การบ่ม ปริมาตรของวัสดุผสมในขวดหมัก ปริมาตรของขวดหมัก การเก็บตัวอย่างก๊าซ การเก็บรวบรวมก๊าซ การกวนผสม และเทคนิคการวัดปริมาตรก๊าซ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ในการวัดปริมาตรก๊าซที่ผลิตขึ้นโดยใช้วิธีการวัดปริมาตรที่แตกต่างกัน 2 วิธี ได้แก่ การวัดจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไป (Manometric method) และการวัดเชิงปริมาตร (Volumetric method)

สำหรับการวัดปริมาตรก๊าซโดยวัดจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปจำเป็นต้องใช้เครื่องมือไมเตอร์ และเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ รวมถึงต้องมีระบบป้องกันการรั่วไหลของก๊าซที่ดี เช่น บริเวณถังปฏิกรณ์และข้อต่อต่าง ๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามอาจเกิดการประเมินปริมาตรของก๊าซที่ต่ำกว่าความเป็นจริง (Underestimation) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรั่วไหลของก๊าซและการละลายของก๊าซลงในของเหลวภายใต้สภาวะความดันเหนือความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ก๊าซที่ละลายลงในของเหลวดังกล่าวยังมีอิทธิพลต่อค่าพีเอชของระบบ และอาจส่งผลให้เกิดการยับยั้งกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศอีกด้วย (Rozzi & Remigi, 2004) นอกจากนี้การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟอาจเกิดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจากการเก็บตัวอย่างก๊าซด้วยมือ เนื่องจากปริมาตรของก๊าซที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟมีผลต่อการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซที่วิเคราะห์ได้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากแรงดันของก๊าซที่สร้างขึ้นจากการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาตรของก๊าซที่เก็บตัวอย่างด้วยมือมีปริมาตรที่ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงควรมีการระบายก๊าซภายในถังปฏิกรณ์และทำการวิเคราะห์อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลา และความละเอียดเป็นอย่างมาก รวมถึงต้องอาศัยทักษะการวิเคราะห์ส่วนบุคคลในการวิเคราะห์

ส่วนการวัดปริมาตรก๊าซโดยการวัดเชิงปริมาตรสามารถทำได้โดยใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำหรือการเก็บรวบรวมก๊าซในถุงเก็บก๊าซ ซึ่งปริมาตรของก๊าซคือปริมาตรของเหลวที่ได้จากการแทนที่หรือปริมาตรที่ได้จากการใช้กระบอกเก็บตัวอย่างก๊าซดูดก๊าซที่เก็บอยู่ภายในถุงเก็บก๊าซ (Liu et al., 2004; Wang et al., 2014) อย่างไรก็ตามอาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นขณะวัดปริมาตรก๊าซโดยใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำ เช่น เกิดการดูดซับหรือแพร่กระจายขององค์ประกอบก๊าซบางส่วนในสารละลายที่ใช้ในการแทนที่ และเกิดการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงควรกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนทำการวัดปริมาตรของก๊าซที่ผลิตขึ้น (Walker et al., 2009)

ทั้งนี้การวัดปริมาตรของก๊าซที่เกิดขึ้นโดยวิธีการวัดจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปหรือโดยวิธีการวัดเชิงปริมาตร ทั้งสองวิธีมีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมนุษย์ที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้และส่งผลให้ผลการทดลองไม่เป็นที่น่าพอใจ

นอกจากการศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนแล้ว การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน และเพื่อให้ทราบถึงลักษณะการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นจึงควรตรวจวัดการผลิตก๊าซแบบทราบผลทันที (Real time) แทนการวัดเป็นครั้งคราว ดังนั้นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสำหรับการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนควรเป็นระบบอัตโนมัติ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมนุษย์รวมถึงภาระงานต่าง ๆ ซึ่งระบบอัตโนมัติเป็นระบบที่สามารถบันทึกผลปริมาตรก๊าซความดัน และอุณหภูมิแบบทันที ซึ่งนำไปใช้อธิบายลักษณะการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นได้อย่างครบถ้วนรวมถึงสามารถทำข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานได้ (Wang, 2016)

3) การวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูล

ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบศัณยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจำเป็นต้องพิจารณา สภาวะแวดล้อมของการทดลอง เช่น อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ เป็นต้น เนื่องจากก๊าซสามารถ ถูกบีบอัดได้ และปริมาตรของก๊าซยังขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการ ทดสอบศัณยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจึงควรนำมาคำนวณและนำเสนอในรูปแบบของสภาวะมาตรฐาน เพื่อให้แน่ใจได้ว่าผลการทดลองถูกต้องและสามารถนำไปเปรียบเทียบได้ (Wang, 2016)

ทั้งนี้ศัณยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุตั้งต้นควรทำให้อยู่ในสภาวะปกติ (Normalization) และแสดงในรูปแบบของมิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยหรือมิลลิลิตร มาตรฐานต่อกรัมซีไอดีที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure, STP) คือ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้กฎของก๊าซอุดมคติ (Ideal gas law) ดังแสดงในสมการที่ 23

$$V_{STP} = \frac{P_{gas}}{P_{STP}} \times \frac{T_{STP}}{T_{gas}} \times V_{gas} \quad (23)$$

โดย V_{STP} = ปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน (มิลลิลิตรมาตรฐาน)

V_{gas} = ปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะทดลอง (มิลลิลิตร)

P_{STP} = ความดันที่สภาวะมาตรฐาน (บรรยากาศ)

P_{gas} = ความดันที่สภาวะทดลอง (บรรยากาศ)

T_{STP} = อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน (เคลวิน)

T_{gas} = อุณหภูมิที่สภาวะทดลอง (เคลวิน)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมและเก็บรักษาตัวอย่างเศษอาหาร

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมและเก็บรักษาตัวอย่างเศษอาหาร ได้แก่

1. เครื่องปั่น (Blender) ของ Moulinette รุ่น 643
2. ถังพลาสติก (Plastic bucket) ขนาด 20 ลิตร
3. ถุงซิปล็อคพลาสติกใส (Zip lock bag) ขนาด 17.8 x 20.3 เซนติเมตร ของ SUNZIP (Anti virus 99%)
4. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของ Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME3002
5. ตู้แช่แข็ง (Freezer) แบบฝาปิด ขนาด 13.4 คิว ของ SANYO รุ่น SF-C1497W
6. เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น บีกเกอร์ (Beaker) มีด (Knife) เขียง (Cutting board) ชาม (Bowl) หม้อต้ม (Stockpot) เตาทำอาหาร (Cooking stove) กระจอน (Colander) และกระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle) เป็นต้น

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมและเก็บรักษาตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อ- ชีวภาพบรรจุอาหาร

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมและเก็บรักษาตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร ได้แก่

1. กรรไกร (Scissors)
2. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของ WEIFO รุ่น DRY-60
3. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของ MEMMERT รุ่น UF5
4. เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น บีกเกอร์ (Beaker) ถาดอลูมิเนียม (Aluminum tray) และถุงซิปล็อคพลาสติกใส (Zip lock bag) เป็นต้น

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร ได้แก่

1. ตู้บ่มเชื้อและควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) ของ WIB Binder รุ่น KBW
2. ก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999

3. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของ Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
4. ขวดแก้วเก็บสารละลาย (Laboratory bottle) ขนาด 500 มิลลิลิตร ของ Duran
5. ฝาพลาสติกชนิดเกลียวมีรู (Plastic screw-cap with aperture) ขนาด GL 45 ของ Duran
6. จุกยางโบรมอบิวทิล (Bromobutyl rubber stopper) ขนาด GL 45 ของ Duran
7. เข็มฉีดยา เบอร์ 27G ความยาว 1 นิ้ว ของ Nipro
8. ข้อต่อสามทางที่มีวาล์วควบคุม (3-way stopcock)
9. เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration apparatus) สายยางซิลิโคน (Silicone rubber hose) กระบอกตวง (Cylinder) และหัวกระจายก๊าซ (Air stone) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเศษอาหารสังเคราะห์แบบแห้ง การเตรียม/ปมหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นและการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง และการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ภาคผนวก ฉ และภาคผนวก ช ตามลำดับ

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์วัสดุตั้งต้น

สารเคมีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการของตัวอย่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร ผู้วิจัยใช้สารเคมีระดับงานวิเคราะห์ (Analytical grade) ซึ่งมีรายละเอียดของสารเคมีและขั้นตอนการเตรียมสารเคมี แสดงในภาคผนวก ข – จ

3.2.2 สารเคมีสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

สารเคมีที่ใช้สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร และอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสม ผู้วิจัยใช้สารเคมีระดับงานวิเคราะห์ ซึ่งมีรายละเอียดของสารเคมีและขั้นตอนการเตรียมสารเคมี แสดงในภาคผนวก ช

นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดของสารเคมีและวิธีการเตรียมสารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้ในการเตรียม/บ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นและการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง และการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ฉ และภาคผนวก ฉ ตามลำดับ

3.3 วัสดุตั้งต้นและการเตรียมตัวอย่าง

วัสดุตั้งต้น (Substrate, S) ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยสารอินทรีย์ 2 ชนิด ได้แก่ เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร โดยแต่ละชนิดมีรายละเอียดและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นดังนี้

3.3.1 เศษอาหาร

เนื่องจากเศษอาหารมีองค์ประกอบที่มีความหลากหลายสูง และองค์ประกอบของเศษอาหารมักแปรผันไปตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ภูมิภาค ฤดูกาล วัฒนธรรม สภาพเศรษฐกิจสังคม และลักษณะของประชากร เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดความคลาดเคลื่อนของการทดลองที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้เศษอาหารที่เกิดขึ้นจริงในสถานการณ์ปัจจุบันซึ่งมีความหลากหลายสูง และเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของเศษอาหารที่นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นให้มีสมบัติที่คงที่และสม่ำเสมอในทุก ๆ การทดลอง การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงดำเนินการเตรียมเศษอาหารโดยการสังเคราะห์ขึ้น (Synthetic food waste, FW) และเนื่องจากไม่พบข้อมูลการรายงานเกี่ยวกับองค์ประกอบของเศษอาหารและสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบของเศษอาหารที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ผู้วิจัยจึงอาศัยข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเศษอาหารจากหลายประเทศในสหภาพยุโรป (ตารางที่ 3.1) และข้อมูลสูตรเศษอาหารสังเคราะห์ที่มีการรายงานโดยการศึกษาต่าง ๆ (ตารางที่ 3.2) เป็นแหล่งอ้างอิงในการจัดเตรียมเศษอาหารสังเคราะห์ โดยเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่า องค์ประกอบของสูตรเศษอาหารสังเคราะห์มักประกอบด้วย ข้าว/พาสต้า/แป้ง/ธัญพืชสำเร็จรูปหรือกึ่งสำเร็จรูป ผัก/ผลไม้ เนื้อสัตว์/เนื้อปลา ขนมอบ/ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผลิตภัณฑ์นม/เครื่องดื่ม ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบโดยทั่วไปอยู่ในเศษอาหารที่เกิดขึ้นในหลายประเทศในสหภาพยุโรป อย่างไรก็ตาม สูตรเศษอาหารสังเคราะห์ดังตารางที่ 3.2 ก็มีสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นไปได้ว่า สูตรเศษอาหารสังเคราะห์ที่มีการรายงานไว้ในการศึกษาต่าง ๆ ดังกล่าว ได้รับการดัดแปลงให้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับลักษณะของเศษอาหารที่เกิดขึ้นในพื้นที่นั้น ๆ จากการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงทำการจัดเตรียมสูตรเศษอาหารสังเคราะห์ให้ มีองค์ประกอบต่าง ๆ เช่นเดียวกับกับสูตรเศษอาหารสังเคราะห์ที่ได้มีการรายงานไว้ในการศึกษาต่าง ๆ ตลอดจนมีสมมติฐานว่า เศษอาหารที่พบอยู่ในขยะมูลฝอยของประเทศไทยมีองค์ประกอบหลักประกอบด้วย ข้าว/เส้นก๋วยเตี๋ยว ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์/เนื้อปลา และมีองค์ประกอบรอง

ประกอบด้วย ขนมปัง/ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผลิตภัณฑ์นม/เครื่องดื่ม ส่งผลให้มีการกำหนดสัดส่วนองค์ประกอบของเศษอาหารสังเคราะห์และสูตรเศษอาหารสังเคราะห์ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1

องค์ประกอบของเศษอาหารที่คัดแยกจากขยะมูลฝอยส่วนที่เป็นอินทรีย์สารของสหราชอาณาจักร ฟินแลนด์ โปรตุเกส และอิตาลี

องค์ประกอบของเศษอาหาร	สัดส่วนองค์ประกอบโดยน้ำหนักสด (ร้อยละ)				
	สหราชอาณาจักร	ฟินแลนด์	โปรตุเกส	อิตาลี	ค่าเฉลี่ย
ข้าว/พาสต้า/แป้ง/ธัญพืชสำเร็จรูปหรือกึ่งสำเร็จรูป (Rice/pasta/flour/cereals)	1.5	0.4	0.2	12.4	3.6
ผัก/ผลไม้ (Vegetables/fruits)	60.9	44.5	59.2	69.0	58.4
เนื้อสัตว์/เนื้อปลา (Meat/fish)	6.7	4.3	7.3	6.2	6.1
ขนมปัง/ผลิตภัณฑ์ขนมอบ (Bread/bakery)	9.0	3.8	3.1	2.8	4.7
ผลิตภัณฑ์นม (Dairy products)	1.7	2.0	0.7	1.4	1.4
เครื่องดื่ม (Drinks)	7.1	27.5	0.2	0.0	8.7
ลูกกวาด ขนม อื่น ๆ (Confectionery, snack etc.)	0.7	3.2	0.3	0.0	1.0
เศษอาหารรวม (Mixed meal)	12.3	6.3	29.0	1.4	12.2
เศษอาหารอื่น ๆ (Other food)	0.2	8.0	0.0	6.9	3.8
รวม	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Compositional analysis of food waste entering the source segregation stream in four European regions and implications for valorization via anaerobic digestion,” โดย Y. Zhang, R. Arnold, T. Paavola, F. Vaz, C. Correia, C. Cavinato, S. Kusch-Brandt, and S. Heaven, 2013, น. 9. ปีลิจิสติกส์ 2013 โดย CISA.

ตารางที่ 3.2

สูตรเศษอาหารสังเคราะห์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

องค์ประกอบเศษอาหารสังเคราะห์	สัดส่วนของสูตรเศษอาหารสังเคราะห์ โดยน้ำหนักสด (ร้อยละ)			
	Abbas et al. (2018)	Radu et al. (2016)	J. Wang et al. (2016)	Ariunbaatar, Panico, Frunzo, et al. (2014)
ข้าว/พาสต้า/แป้ง/ธัญพืชสำเร็จรูปหรือกึ่งสำเร็จรูป (Rice/pasta/flour/cereals)	42.0	–	10.0	5.0
ผัก/ผลไม้ (Vegetables/fruits)	43.0	59.0	70.0	79.0
เนื้อสัตว์/เนื้อปลา (Meat/fish)	15.0	11.0	20.0	8.0
ขนมปัง/ผลิตภัณฑ์ขนมอบ (Bread/bakery)	–	16.0	–	6.0
ผลิตภัณฑ์นม/เครื่องดื่ม (Dairy products/drink)	–	14.0	–	2.0
รวม	100.0	100.0	100.0	100.0

ตารางที่ 3.3

องค์ประกอบและสัดส่วนของเศษอาหารสังเคราะห์และสูตรเศษอาหารสังเคราะห์สำหรับการทดลอง

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนักสด	สูตรอาหาร	กรัมน้ำหนักสด
องค์ประกอบหลัก	ข้าว/เส้นก๋วยเตี๋ยว	ข้าวสุก	250
		เส้นหมี่ขาวปรุงสุก	110
		ผัก	20
	ผัก	ผักกาดขาวปรุงสุก	50
		แครอทปรุงสุก	50
		ผักกาดหอมดิบ	50
		กะหล่ำปลีดิบ	50
		ผลไม้	20
	ผลไม้	เปลือกกล้วย	70
		เปลือกแตงโม	70
		เปลือกสับปะรด	60
	เนื้อสัตว์/เนื้อปลา	เนื้อไก่ปรุงสุก	80
เนื้อหมูปรุงสุก		80	
เนื้อปลาปรุงสุก		40	
องค์ประกอบรอง	ขนมปัง/ผลิตภัณฑ์ขนมอบ	ขนมปังแผ่น	10
		โดนัท	10
	นม/เครื่องดื่ม	นมสด	10
		น้ำอัดลม	10
รวม	100	รวม	1,000

สำหรับวัตถุดิบต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเป็นเศษอาหารตามสูตรที่ระบุในตารางที่ 3.3 นั้น ได้ทำการจัดหาและจัดซื้อจากซูเปอร์มาร์เก็ตหรือตลาด ในอำเภอเมืองนครปฐม จังหวัด นครปฐม โดยทำการจัดเตรียมและจัดทำตามสัดส่วนที่ระบุไว้ ด้วยวิธีการตัด หั่น หรือสับ ให้มีขนาด เล็กกลง และนำไปบดให้ละเอียดโดยใช้เครื่องปั่น (Blender) (ภาพที่ 3.1) แล้วบรรจุลงในถุงพลาสติก และนำไปเก็บรักษาในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 3.2) เพื่อนำไปใช้ในการ วิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ และศึกษาศักยภาพการ ผลิตก๊าซมีเทน

ภาพที่ 3.1

ลักษณะของเศษอาหารสังเคราะห์

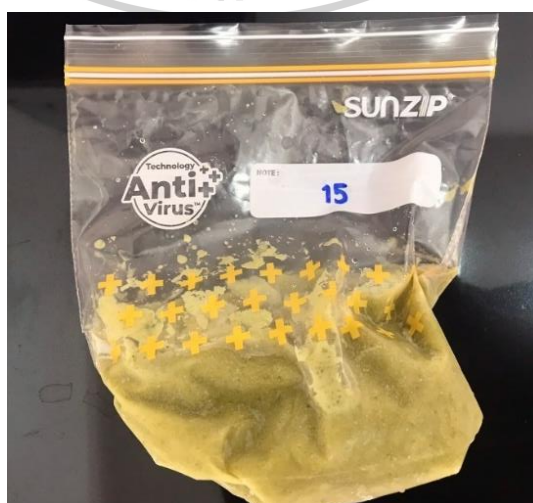


(ก) ก่อนบดละเอียด

(ข) หลังบดละเอียด

ภาพที่ 3.2

ลักษณะตัวอย่างเศษอาหารสังเคราะห์ที่ผ่านการแช่แข็ง



3.3.2 ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (Cellulose-based food packaging product, CFPP) ที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นภาชนะรองรับอาหารที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติทั้งหมด โดยเป็นส่วนผสมของเยื่อชานอ้อยกับเยื่อไผ่ มีชื่อทางการค้าว่า เกรซ ซิมเปิล (Gracz simple) ประเภท “Australian Plate 7 inches” ของบริษัท บรรจุภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) โดยนำมาทำการตัดให้มีขนาดประมาณ 0.5 x 0.5 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.3) หลังจากนั้นผสมคลุกเคล้าตัวอย่างวัสดุตั้งต้นดังกล่าวให้เข้ากันและอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น แล้วทำการเก็บรักษาไว้ในถุงพลาสติก ผนึก อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ และศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ภาพที่ 3.3

ลักษณะของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร



(ก) ก่อนตัด

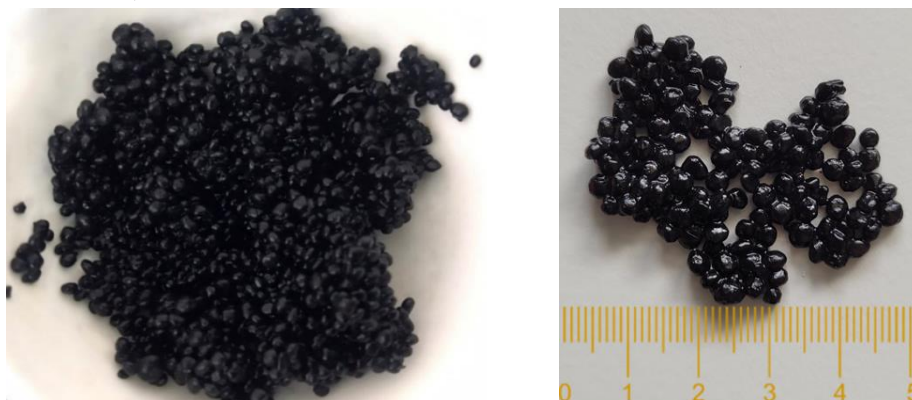
(ข) หลังตัด

3.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum, I) ที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ ตะกอนจุลินทรีย์ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) ของบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) (โรงงานปทุมธานี) ตำบลบางชะแยง อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Granule) สีดำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 – 2 มิลลิเมตร (ภาพที่ 3.4) ทั้งนี้ก่อนนำตะกอนจุลินทรีย์มาใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ในงานวิจัยนั้น ได้มีการเตรียมตะกอนจุลินทรีย์และบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ ตามรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ฉ

ภาพที่ 3.4

ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์



3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของวัสดุตั้งต้น

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร เป็นการนำตัวอย่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นจากหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ มาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.4 โดยแต่ละพารามิเตอร์มีจำนวนซ้ำในการวิเคราะห์เท่ากับ 3 ซ้ำ ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์แสดงดังภาคผนวก ข - จ

ตารางที่ 3.4

พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
พีเอช (pH)	เครื่องวัดพีเอช (accumet™ AB150)	APHA et al. (2017)
ของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)	การอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส	APHA et al. (2017); USEPA (2001)
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)	การเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	APHA et al. (2017); USEPA (2001)
ของแข็งคงตัว (Fixed solids, FS)	การเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	APHA et al. (2017); USEPA (2001)
อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon, OC)	Walkley and Black method	Fagbenro and Oyeleye (1999); Nelson and Sommers (1996)

ตารางที่ 3.4

พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)	การย่อย (Digestion) การกลั่น (Distillation) และการไทเทรต (Titration)	ASTM International (2006)
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, TP)	การย่อยด้วยกรดผสมระหว่าง $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HClO}_4$ อัตราส่วน 3:1:1	Nelson and Sommers (1996); Twyman (2005)
ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)	วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux method)	Raposo et al. (2008)
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio)	จากการคำนวณ	-

3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหารผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นการนำตัวอย่างเศษอาหารแห้ง (ภาคผนวก ก) และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้นจากหัวข้อ 3.3.2 มาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.5 โดยแต่ละพารามิเตอร์มีจำนวนซ้ำในการวิเคราะห์เท่ากับ 3 ซ้ำ ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์แสดงดังภาคผนวก ง และภาคผนวก จ

ตารางที่ 3.5

พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
สารแทรก (Extractives, EXT)	การสกัดด้วยอะซีโตน	Ayeni et al. (2013)
เซลลูโลส (Cellulose, CEL)	จากการคำนวณ	Ayeni et al. (2013)
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose, HEM)	การย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	Ayeni et al. (2013)
ลิกนิน (Lignin, LIG)	การไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก	Ayeni et al. (2013); Sluiter et al. (2008)

3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ เป็นการนำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้นจากหัวข้อ 3.4 มาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.6 โดยแต่ละพารามิเตอร์มีจำนวนซ้ำในการวิเคราะห์เท่ากับ 3 ซ้ำ ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์แสดงดังภาคผนวก ข

ตารางที่ 3.6

พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
พีเอช (pH)	เครื่องวัดพีเอช (accumet™ AB150)	APHA et al. (2017)
ของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)	การอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส	APHA et al. (2017); USEPA (2001)
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)	การเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	APHA et al. (2017); USEPA (2001)
ของแข็งคงตัว (Fixed solids, FS)	การเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	APHA et al. (2017); USEPA (2001)

3.8 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical methane potential, BMP) โดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (วัสดุตั้งต้น) ได้ดำเนินการตามวิธีที่ระบุไว้ในงานวิจัยของ Angelidaki et al. (2009) และ Hansen et al. (2004) โดยมีการดำเนินการทดลองเป็นแบบแบตช์ (Batch experiment) และมีการดัดแปลงวิธีการทดลองบางส่วน เพื่อให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของการศึกษานี้

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ส่งผลให้ระบบการย่อยสลายเพื่อการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในสภาวะสมดุลและมีประสิทธิภาพดี และชุดการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นต่อผลผลิตก๊าซมีเทน แต่ละชุดการทดลองมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อ 3.8.1 และ 3.8.2 ตามลำดับ

3.8.1 การทดลองชุดที่ 1: อัตราส่วนวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 6 อัตราส่วน

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในการทดลองนี้ มีอัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP) ที่ทำการศึกษทั้งหมด 6 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) ดำเนินการทดลองในขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร (ขวดหมัก) โดยในแต่ละอัตราส่วน (ชุดทดลอง) เมื่อเริ่มต้นการหมักจะทำการใส่วัสดุตั้งต้นที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 5 กรัม ลงในขวดหมัก จากนั้นเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์โดยกำหนดให้มีอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 2 (10 กรัมของแข็งระเหยง่าย) และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต จำนวน 2.69 กรัม เพื่อให้ของผสมภายในขวดหมักมีปริมาณความเป็นด่าง (Alkalinity) เริ่มต้นประมาณ 4,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร (McCarty, 1964) ต่อมาเติมน้ำกลั่นปราศจากออกซิเจนลงในขวดหมัก จนของผสมภายในขวดหมักมีปริมาตร 400 มิลลิลิตร ปิดปากขวดหมักด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฝาพลาสติกชนิดเกลียวมีรูทางซึมฉีดยาซึ่งต่ออยู่กับวาล์วสามทางผ่านจุกยางที่ปิดขวดหมัก เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมักไปยังอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซมีเทน หลังจากนั้นนำขวดหมักไปวางไว้ในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3.5) เป็นระยะเวลา 60 วัน และตลอดระยะเวลาของการหมัก มีการเขย่าขวดหมักเป็นครั้งคราว ทั้งนี้ในสัปดาห์แรกของการหมัก ได้ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนทุกวัน หลังจากนั้นตรวจวัดเป็นครั้งคราว นอกจากนี้ได้ทำขวดหมักที่ไม่ใส่วัสดุตั้งต้น แต่ใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว (ชุดควบคุม) และดำเนินการตามขั้นตอนต่าง ๆ ในสถานะเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้นด้วย ทั้งนี้ในทุก ๆ ชุดทดสอบ (ชุดทดลองและชุดควบคุม) มีการดำเนินการ 3 ซ้ำ

3.8.2 การทดลองชุดที่ 2: อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน 5 อัตราส่วน

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในการทดลองนี้ มีอัตราส่วนของหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (I/S) ที่ทำการศึกษทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) ดำเนินการทดลองในขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร (ขวดหมัก) เมื่อเริ่มต้นการหมักจะทำการใส่อัตราส่วนวัสดุตั้งต้นที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.8.1 ที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 5 กรัม ลงในขวดหมัก จากนั้นเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่ายแตกต่างกันเท่ากับ 2.5 5 7.5 10 และ 12.5 กรัม เพื่อให้แต่ละชุดการทดลองมีอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 ตามลำดับ (ชุดทดลอง) และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต จำนวน 2.69 กรัม เพื่อให้ของผสมภายในขวดหมักมีปริมาณความเป็นด่าง (Alkalinity) เริ่มต้นประมาณ 4,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร (McCarty, 1964) ต่อมาเติมน้ำกลั่นปราศจากออกซิเจนลงในขวดหมัก จนของผสมภายในขวดหมักมีปริมาตร 400 มิลลิลิตร ปิดปากขวดหมักด้วยจุกยางและรัดให้แน่นด้วยฝาพลาสติกชนิดเกลียวมีรูทางซึมฉีด

ยาซึ่งต่ออยู่กับวาล์วสามทางผ่านจุกยางที่ปิดขวดหมัก เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมักไปยังอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซมีเทน หลังจากนั้นนำขวดหมักไปวางไว้ในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 วัน และตลอดระยะเวลาของการหมัก มีการเขย่าขวดหมักเป็นครั้งคราว ทั้งนี้ในสัปดาห์แรกของการหมัก ได้ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนทุกวัน หลังจากนั้นตรวจวัดเป็นครั้งคราว นอกจากนี้ได้ทำขวดหมักที่ไม่ใส่วัสดุตั้งต้น แต่ใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว (ชุดควบคุม) ในทุก ๆ อัตราส่วน (I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1) และดำเนินการตามขั้นตอนต่าง ๆ ในสภาวะเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้นด้วย ทั้งนี้ในทุก ๆ ชุดทดสอบ (ชุดทดลองและชุดควบคุม) มีการดำเนินการ 3 ซ้ำ

ภาพที่ 3.5

ขวดหมักที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน



3.8.3 การตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขวดหมักของทั้ง 2 ชุดการทดลอง

สำหรับการวัดปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดหมักใช้วิธีการผ่านก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปยังสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 12 เพื่อดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้คงเหลือไว้เพียงก๊าซมีเทนซึ่งสามารถทราบปริมาณได้โดยการแทนที่น้ำ (ภาพที่ 3.6) ทั้งนี้ปริมาณก๊าซมีเทนที่วัดได้จากขวดหมักของชุดทดลองเป็นผลรวมของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นและการย่อยสลายตัวเองของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนปริมาณก๊าซมีเทนที่วัดได้จากขวดหมักชุดควบคุมเป็นปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายตัวเองของหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว

$$Y = \frac{V_0}{VS_{\text{substrate}}} \quad (25)$$

โดย Y = ผลผลิตก๊าซมีเทน (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)
 V_0 = ปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน (มิลลิลิตรมาตรฐาน)
 $VS_{\text{substrate}}$ = ปริมาณของแข็งระเหยง่ายของวัสดุตั้งต้น (กรัม)

3.9 การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก

การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมักของการทดลองชุดที่ 1 และการทดลองชุดที่ 2 ดำเนินการในเฟสของเหลว โดยทำการสุ่มชุดทดลองจากหัวข้อ 3.8.1 และ 3.8.2 ออกจากระบบการย่อยสลาย (ตู้บ่ม) เป็นครั้งคราว ตลอดช่วงระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน เพื่อตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายในเฟสของเหลว ดำเนินการโดยทำการสุ่มขวดหมักในชุดทดลองของแต่ละอัตราส่วนจำนวน 1 ขวด ในวันที่ 0 2 5 9 15 29 45 และ 60 ของการย่อยสลาย เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.7 โดยแต่ละพารามิเตอร์มีการวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่าง จำนวน 2 ซ้ำ ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนการเตรียมและวิธีวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์แสดงดังภาคผนวก ฅ

ตารางที่ 3.7

พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจติดตามในเฟสของเหลว

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
พีเอช (pH)	เครื่องวัดพีเอช (accumet™ AB150)	APHA et al. (2017)
กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs)	Esterification method และการวัดสี (Colorimetric method)	Montgomery et al. (1962)
ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk)	การไทเทรต (Titration)	APHA et al. (2017)
อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง (Volatile fatty acids to alkalinity ratio, VFAs/Alk ratio)	จากการคำนวณ	Lossie and Pütz (2010)
แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia, TAN)	การกลั่น (Distillation) และการไทเทรต (Titration)	APHA et al. (2017)
ซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand, SCOD)	รีฟลักซ์แบบปิด (Close reflux method) และการวัดสี (Colorimetric method)	APHA et al. (2017)

3.10 จลนพลศาสตร์ของการหมักร่วม

การศึกษานี้ได้นำโมเดลทางคณิตศาสตร์ (Modified Gompertz model) มาประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ ได้แก่ ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการทำนาย (Y_0) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (μ_m) และระยะเวลาปรับตัว (λ) รวมถึงทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นในการทดลองชุดที่ 1 และการทดลองชุดที่ 2 ซึ่งมีรูปแบบของสมการเชิงคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ 26

$$Y_t = Y_0 \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_m}{Y_0} \cdot \exp(\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (26)$$

- โดย Y_t = ผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนาย (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ตลอดระยะเวลาการหมัก t
- Y_0 = ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการทำนาย (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)
- μ_m = อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย-วัน)
- λ = ระยะเวลาปรับตัว (วัน)
- t = ระยะเวลาในการหมัก (วัน)

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการตัวแบบของ Modified Gompertz model ได้ใช้รูปแบบการวิเคราะห์ถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of least squares) เพื่อทดสอบความเหมาะสม (Model fitting) ของโมเดล ซึ่งดำเนินการโดยนำข้อมูลผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่สภาวะมาตรฐานและที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการหมักในทุกอัตราส่วน ตลอดระยะเวลา 60 วัน ใส่เข้าไปในโปรแกรม Microsoft® Excel® 365 และใช้ฟังก์ชันที่เรียกว่า Solver ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ทำให้ผลรวมของค่าเศษเหลือกำลังสอง (Sum of squared residual) ของผลต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลองมีค่าน้อยที่สุด (Lay et al., 1996; Samuel et al., 2017)

นอกจากนี้ได้ประเมินความแม่นยำในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของ Modified Gompertz model โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังสมการที่ 27 ทั้งนี้ R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกคุณภาพของโมเดล โดยค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าโมเดลดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ %Error และ RMSE เป็นค่าที่

บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายของโมเดล ดังนั้นโมเดลที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสมควรมี R^2 สูง และ/หรือ %Error น้อยกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 10 (Raposo et al., 2009) และ/หรือ RMSE ต่ำ

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{mod,t} - Y_{exp,t})^2}{N}} \quad (27)$$

โดย $Y_{mod,t}$ = ผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายของโมเดล (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ตลอดระยะเวลาการหมัก t
 $Y_{exp,t}$ = คือผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ตลอดระยะเวลาการหมัก t
 N = จำนวนข้อมูล

3.11 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การศึกษานี้มีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในด้านต่าง ๆ ได้แก่

1. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย ของแข็งคงตัว อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ฟอสฟอรัสทั้งหมด และซีโอดี
2. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ได้แก่ สารแทรก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
3. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย และของแข็งคงตัว
4. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นในการทดลองชุดที่ 1 และการทดลองชุดที่ 2 ได้แก่ กรดไขมันระเหยง่าย ความเป็นต่าง แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด และซีโอดีละลาย
5. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน ตลอดจนผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเต็ม/ไม่เต็ม โซเดียมไบคาร์บอเนต ในการทดลองชุดที่ 1 และการทดลองชุดที่ 2 ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

ในการศึกษาการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นต่อผลผลิตก๊าซมีเทน ได้มีการจำแนกผลการศึกษาออกเป็นด้านต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์ ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นต่อผลผลิตก๊าซมีเทน และจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น ซึ่งมีข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่นำมาใช้หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก ฎ - ป และมีรายละเอียดของผลและวิจารณ์ผลการศึกษา ดังนี้

4.1 ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (วัสดุตั้งต้น) และหัวเชื้อจุลินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเศษอาหารที่นำมาใช้ในการศึกษามีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 6.43 ซึ่งมีความเป็นกรดน้อยกว่าเศษอาหารในการศึกษาของ Akhator and Musa (2022) และ Brown and Li (2013) ที่พบว่า เศษอาหารที่นำมาใช้ในการศึกษามีค่าพีเอชเท่ากับ 4.21 และ 4.10 ตามลำดับ ทั้งนี้เศษอาหารในการศึกษานี้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS) ร้อยละ 16.37 และในปริมาณของแข็งทั้งหมดมีปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solid, VS) เป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 96.35 ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับการศึกษาของ Zhang et al. (2011) ที่พบว่า เศษอาหารมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 18.10 และมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 94.48 ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 98.47 และมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายสูงถึงร้อยละ 99.51 ทั้งนี้มีปริมาณสูงกว่าการศึกษาของ Brown et al. (2012) ที่พบว่า เศษกระดาษมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 94.2 และมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 83.9 อย่างไรก็ตามมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายใกล้เคียงกับการศึกษาของ Agyemang (2021) ที่พบว่า เยื่อกระดาษจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายประมาณร้อยละ 99

จากปริมาณของแข็งระเหยง่ายซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง รวมถึงปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon, OC) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 50 ของวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด แสดงให้เห็นว่า เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุ

ตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ ทั้งนี้แม้ว่าเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารจะมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เศษอาหารมีไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) ในปริมาณที่สูงกว่ามาก (ร้อยละ 5.49) ส่งผลให้เศษอาหารมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio) เท่ากับ 12 โดยมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Brown and Li (2013) ที่พบว่าเศษอาหารมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 11.4 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลาย (20 – 30) (Kothari et al., 2014; Li et al., 2011) นอกจากนี้ยังมีเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose, HEM) ซึ่งมีโครงสร้างของสายพอลิเมอร์ที่สั้น มีกิ่งก้านสาขา และเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกต่ำสูงถึงร้อยละ 80 ส่งผลให้เศษอาหารสามารถเกิดการไฮโดรไลซิสโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซิสได้เร็ว (Mussatto & Teixeira, 2010) จึงมีความเป็นไปได้ว่า หากนำไปใช้ในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อาจทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากการขาดแคลนคาร์บอน และอาจเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดในระบบมาก จนส่งผลให้มีระดับพีเอชที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนได้ในที่สุด ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร แม้ว่าอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ แต่ก็มีเซลลูโลส (Cellulose, CEL) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบปริมาณมากที่สุดในวัสดุลิกโนเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 80 โดยทั่วไปวัสดุลิกโนเซลลูโลสส่วนใหญ่มักมีโครงสร้างเซลลูโลสที่ประกอบด้วยโครงสร้างส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงประมาณ 2 ใน 3 ของโครงสร้างเซลลูโลสทั้งหมด จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพเกิดการไฮโดรไลซิสได้ค่อนข้างช้า (Mussatto & Teixeira, 2010) นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นต่ำมาก (ร้อยละ 0.11) จึงส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงถึง 460 ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าการศึกษาของ Brown et al. (2012) ที่พบว่า เศษกระดาษมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 323.5 แสดงให้เห็นว่าหากนำผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารไปใช้ในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศเพียงชนิดเดียว อาจทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลงได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างของเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงและละลายน้ำได้ยาก และอาจเกิดการขาดแคลนไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศได้ด้วยเช่นกัน

หัวเชื้อจุลินทรีย์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อความเสถียรและการเริ่มต้นเดินระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.94 ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างเป็นกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชของหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการศึกษาของ Brown et al. (2012) และ Chen et al. (2014) ที่พบว่า หัวเชื้อจุลินทรีย์มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.80 และ 7.46 ตามลำดับ ดังนั้นหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการศึกษานี้จึงมีความเหมาะสมต่อการ

เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Bajpai, 2017) นอกจากนี้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการศึกษายังมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายสูงถึงร้อยละ 91.22 ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายของหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการศึกษาของ Brown et al. (2012) และ Chen et al. (2014) ที่พบว่าหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณของแข็งระเหยง่ายเพียงร้อยละ 53.25 และ 47.06 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หัวเชื้อจุลินทรีย์ของการศึกษานี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพของจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.1

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	หน่วย	เศษอาหาร สังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพ บรรจุอาหาร	หัวเชื้อจุลินทรีย์
<i>สมบัติทางเคมีกายภาพ</i>				
พีเอช (pH)		6.43 ± 0.13	-	6.94 ± 0.32
ของแข็งทั้งหมด (TS)	%	16.37 ± 0.06	98.47 ± 0.08	8.32 ± 0.16
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	% TS	96.35 ± 0.61	99.51 ± 0.01	91.22 ± 0.25
ของแข็งคงตัว (FS)	% TS	3.65 ± 0.61	0.49 ± 0.01	8.78 ± 0.25
อินทรีย์คาร์บอน (OC)	% TS	64.70 ± 0.22	50.63 ± 0.17	-
ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (TKN)	% TS	5.49 ± 0.01	0.11 ± 0.01	-
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	% TS	0.03 ± 0.00	ตรวจไม่พบ	-
ซีโอดี (COD)	mg O ₂ /g VS	1,335 ± 18	1,108 ± 10	-
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)		12 ^a	460 ^a	-
<i>องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ</i>				
สารแทรก (ETX)	% TS	5.16 ± 0.07	ตรวจไม่พบ	-
เซลลูโลส (CEL)	% TS	0.85 ^b	79.15 ^b	-
เฮมิเซลลูโลส (HEM)	% TS	81.87 ± 1.95	7.38 ± 0.04	-
ลิกนิน (LIG)	% TS	8.47 ± 0.16	12.98 ± 0.37	-

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- ไม่มีเคราะห์

a คำนวณจาก C/N ratio = OC/TKN

b คำนวณจาก %CEL = 100 - (%FS + %EXT + %HEM + %LIG) โดยที่ %EXT (Extractive หรือ สารแทรก) = 0 (ตรวจไม่พบ)

4.2 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพ บรรจุอาหาร

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical methane potential, BMP) โดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP) ที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลา 60 วัน ได้จำแนกการศึกษาของชุดการทดลองในอัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร จำนวน 6 อัตราส่วน ออกเป็นด้านต่าง ๆ ได้แก่ การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม และจลนพลศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

4.2.1 การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก

การตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายในเฟสของเหลว เป็นการนำของเหลวภายในขวดหมักมาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลาย ได้แก่ พีเอช (pH) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs) ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk) อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง (Volatile fatty acids to alkalinity ratio, VFAs/Alk ratio) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen, TAN) และซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand, SCOD) โดยดำเนินการวิเคราะห์ในวันที่ 0 2 5 9 15 29 45 และ 60 ของการย่อยสลาย ซึ่งมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ดังนี้

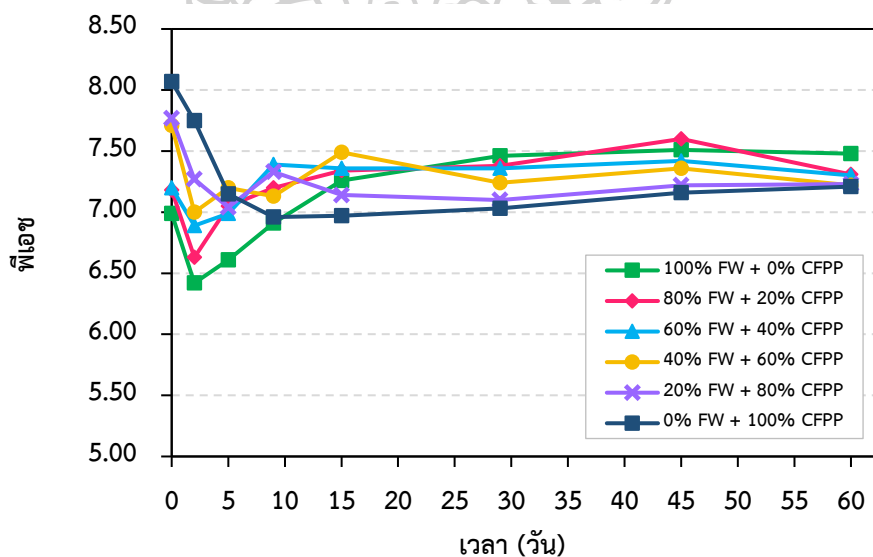
1) ค่าพีเอช

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชภายในขวดหมักของทุกอัตราส่วนตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของทุกอัตราส่วนมีค่าตั้งแต่ 6.99 – 8.07 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม (พีเอช 6.5 – 8.0) สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทน (Methanogenic archaea) แนะนำโดย Mao et al. (2015) ทั้งนี้ในช่วงเริ่มต้นของการหมัก สังเกตได้ว่า ทุกอัตราส่วนมีค่าพีเอชลดลงต่ำกว่าระดับพีเอชเริ่มต้น ซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากการดำเนินกิจกรรมของกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด (Acidogenic bacteria หรือ Fermentative bacteria) จึงบ่งชี้ได้ว่า วัสดุตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบของทุก ๆ อัตราส่วนมีการย่อยสลายเกิดขึ้นและก่อให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบ โดยอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 ซึ่งประกอบด้วยเศษอาหารที่จัดเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูงเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 60 เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าและเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบมากกว่า จึงส่งผลให้ระดับพีเอชลดลงต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 20:80 และ 0:100 ซึ่งมีผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุ

อาหารที่มีความสามารถในการย่อยสลายต่ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ทั้งนี้สังเกตเห็นว่าในระบบของทุกอัตราส่วนมีการปรับพีเอชเข้าสู่สมดุลเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ และกลับมามีระดับพีเอชใกล้เคียงกันและมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 9 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย โดยมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.96 – 7.60 ด้วยเหตุที่การศึกษานี้ได้มีการเติมพีเอชบัฟเฟอร์ในรูปของโซเดียมโบคาร์บอเนตลงในช่วงหมัก รวมถึงมีการสะสมของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นภายในระบบ จึงเป็นสาเหตุทำให้ระดับพีเอชยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย โดยมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Srikanlayanukul and Suksabye (2020) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและหญ้าแฝกได้มีการเติมพีเอชบัฟเฟอร์ ส่งผลให้ระดับพีเอชอยู่ในช่วง 6.50 – 7.50 ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลาย

ภาพที่ 4.1

การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมโบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



ตารางที่ 4.2

การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	พีเอช							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	6.99	6.42	6.61	6.91	7.26	7.46	7.51	7.48
FW/CFPP 80:20	7.18	6.63	7.05	7.20	7.34	7.38	7.60	7.31
FW/CFPP 60:40	7.20	6.89	6.99	7.39	7.36	7.36	7.42	7.30
FW/CFPP 40:60	7.71	7.00	7.20	7.13	7.49	7.24	7.36	7.22
FW/CFPP 20:80	7.77	7.27	7.04	7.33	7.14	7.10	7.22	7.23
FW/CFPP 0:100	8.07	7.75	7.15	6.96	6.97	7.03	7.16	7.21

2) กรดไขมันระเหยง่าย

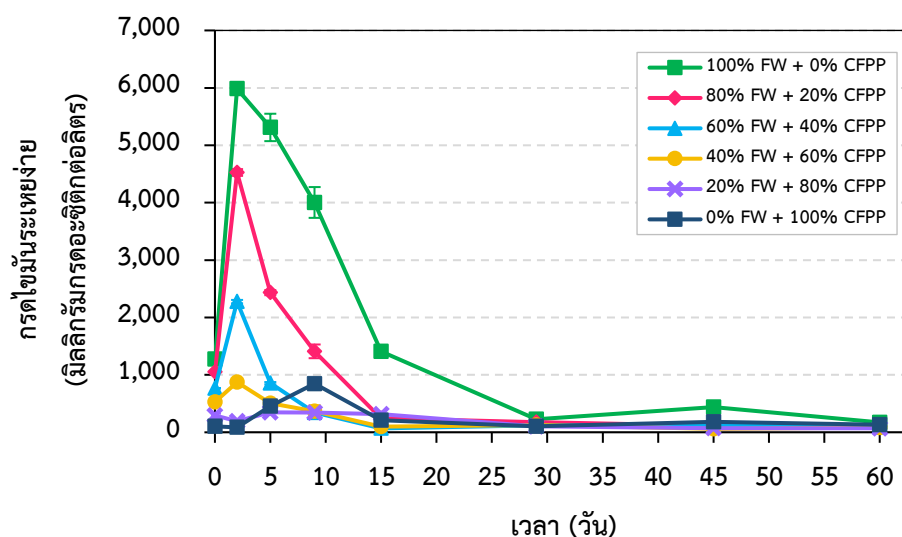
โดยทั่วไปกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศจะสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) ได้ในที่สุดโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทน อย่างไรก็ตาม การสะสมของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบมากจนเกินไป (ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร) จะส่งผลให้ปริมาณความเป็นต่างและค่าพีเอชของระบบลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมต่อการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนตามลำดับ และทำให้ระบบเกิดความเหลวในที่สุด (Zhang et al., 2014)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมสูงในช่วงวันที่ 2 – 9 ในช่วงวันที่ 2 – 5 และในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย ตามลำดับ และสะสมเป็นปริมาณสูงสุดเท่ากับ 5,984 4,526 และ 2,277 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 20:80 และ 0:100 มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมสูงสุดในวันที่ 2 5 และ 9 ของการย่อยสลาย ตามลำดับ (873 347 และ 847 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร ตามลำดับ) แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า การเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบมีปริมาณเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้นตามสัดส่วนของเศษอาหารที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากเศษอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูงจึงเกิดการย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันระเหยง่ายโดยกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดได้เร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพรจจาอาหารมีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ระบบต้องอาศัยการปรับตัวเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงเกิดการย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้ช้ากว่า ซึ่งสอดคล้องกับ

การศึกษาของ Suarez et al. (2022) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและขยะจากสวน/สวนสาธารณะในอัตราส่วน 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 100:0 มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมสูงขึ้นตามสัดส่วนเศษอาหารที่เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมสูงสุดประมาณ 5,000 5,000 4,000 2,500 และ 1,500 มิลลิกรัมซีไอต่ิลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการหมักของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 จะมีปริมาณกรดไขมันง่ายสะสมภายในระบบสูงกว่า 2,000 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่ิลิตร ในช่วงวันที่ 2 – 9 ในช่วงวันที่ 2 – 5 และในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย แต่ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบให้ระบบเกิดความล้มเหลว เนื่องด้วยการศึกษานี้มีการเติมพีเอชบัฟเฟอร์ในรูปแบบของโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ แต่พบว่า ส่งผลให้ระดับพีเอชภายในระบบเสียสมดุลเล็กน้อยและทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 ในช่วงวันดังกล่าวมีอัตราการผลิตที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่มีอัตราการผลิตลดลงด้วยเช่นกัน (หัวข้อที่ 4.2.2 ภาพที่ 4.7 (ก) และตารางที่ 4.8) ทั้งนี้ ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ก็ลดลงทันทีหลังจากเกิดการสะสมในปริมาณสูงสุด รวมถึงมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 29 ของการย่อยสลาย จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย โดยมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมเหลือเพียง 70 – 173 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่ิลิตร ซึ่งเป็นผลมาจากกรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมสมอยู่ภายในระบบถูกเปลี่ยนไปเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ภาพที่ 4.2

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



ตารางที่ 4.3

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	กรดไขมันระเหยง่าย (มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	1,273 ± 41	5,984 ± 88	5,310 ± 239	4,003 ± 268	1,410 ± 52	228 ± 29	437 ± 14	173 ± 17
FW/CFPP 80:20	1,051 ± 18	4,526 ± 59	2,433 ± 45	1,410 ± 119	246 ± 7	174 ± 7	114 ± 19	104 ± 6
FW/CFPP 60:40	766 ± 3	2,277 ± 29	856 ± 20	343 ± 109	68 ± 35	120 ± 6	118 ± 30	94 ± 1
FW/CFPP 40:60	529 ± 13	873 ± 29	505 ± 34	364 ± 106	99 ± 6	128 ± 3	61 ± 9	82 ± 1
FW/CFPP 20:80	292 ± 32	193 ± 24	347 ± 15	342 ± 2	314 ± 10	103 ± 1	72 ± 39	70 ± 12
FW/CFPP 0:100	107 ± 0	85 ± 1	455 ± 64	847 ± 18	213 ± 83	104 ± 37	181 ± 19	135 ± 13

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3) ความเป็นต่าง

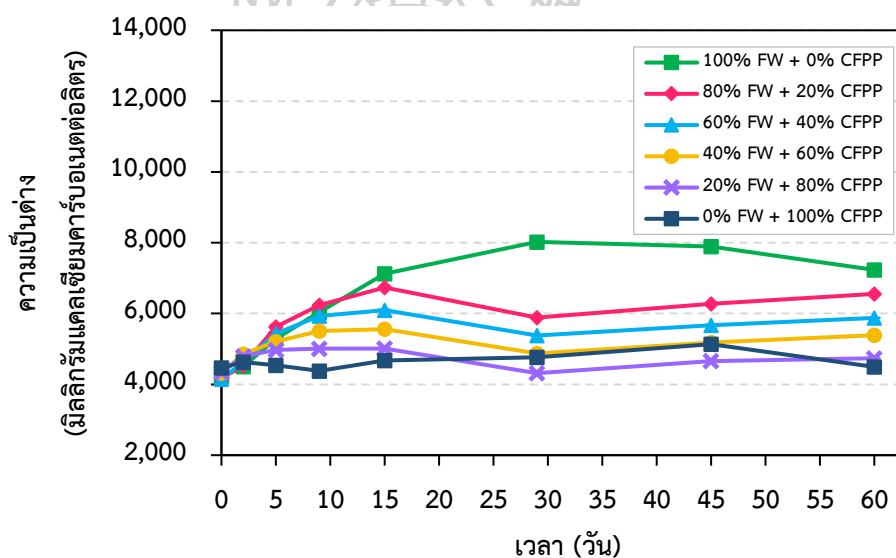
โดยปกติการเกิดสภาวะที่ไม่สมดุลของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมักมีสาเหตุสำคัญมาจากในระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก หากในระบบมีความเป็นต่างที่ไม่เพียงพอ ก็จะส่งผลให้ระดับพีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีการเติมความเป็นต่างในรูปของไบคาร์บอเนต เพื่อทำให้ระบบมีความเป็นต่างที่เพียงพอสำหรับสะท้อนกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลาย และสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในสภาวะสมดุลตลอดระยะเวลาการหมัก

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่าง ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า ทุกอัตราส่วนมีปริมาณความเป็นต่างเริ่มต้นประมาณ 4,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (1,000 – 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร) สำหรับสะท้อนกรดไขมันระเหยง่าย แนะนำโดย McCarty (1964) และเพียงพอสำหรับต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ตลอดระยะเวลาการหมัก 60 วัน แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 และ 40:60 ก็มีปริมาณความเป็นต่างเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ในวันที่ 5 ของการย่อยสลาย และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 15 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของความเป็นต่างในช่วงวันดังกล่าว ก็เป็นผลมาจากภายในระบบมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดซึ่งได้จากการย่อยสลายเศษอาหารที่อุดมไปด้วยโปรตีนเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (ภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.5) ที่พบว่า ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดที่สะสมอยู่ในระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย และมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 15 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย

จึงส่งผลให้ระบบมีความเป็นต่างเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 20:80 และ 0:100 มีปริมาณความเป็นต่างอยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาการหมัก โดยมีปริมาณความเป็นต่างประมาณ 4,000 – 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ทั้งนี้ทุกอัตราส่วนของการศึกษานี้มีปริมาณความเป็นต่างในระบบสูงกว่าการศึกษาของ Suarez et al. (2022) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและขยะจากสวน/สวนสาธารณะในอัตราส่วน 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 100:0 มีปริมาณความเป็นต่างประมาณ 2,000 – 3,500 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร

ภาพที่ 4.3

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



ตารางที่ 4.4

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	4,228 ± 7	4,500 ± 33	5,293 ± 28	6,036 ± 12	7,123 ± 0	8,024 ± 0	7,894 ± 120	7,236 ± 17
FW/CFPP 80:20	4,172 ± 7	4,533 ± 13	5,625 ± 57	6,235 ± 30	6,736 ± 6	5,883 ± 17	6,278 ± 16	6,556 ± 12
FW/CFPP 60:40	4,148 ± 13	4,627 ± 27	5,434 ± 28	5,935 ± 0	6,096 ± 19	5,376 ± 6	5,666 ± 21	5,880 ± 0
FW/CFPP 40:60	4,325 ± 13	4,851 ± 4	5,207 ± 7	5,505 ± 24	5,560 ± 13	4,872 ± 45	5,184 ± 10	5,385 ± 12
FW/CFPP 20:80	4,335 ± 13	4,788 ± 27	4,971 ± 28	5,008 ± 0	5,010 ± 25	4,316 ± 11	4,658 ± 10	4,738 ± 6
FW/CFPP 0:100	4,465 ± 13	4,632 ± 7	4,538 ± 0	4,380 ± 6	4,676 ± 26	4,769 ± 43	5,134 ± 0	4,494 ± 23

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4) อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง

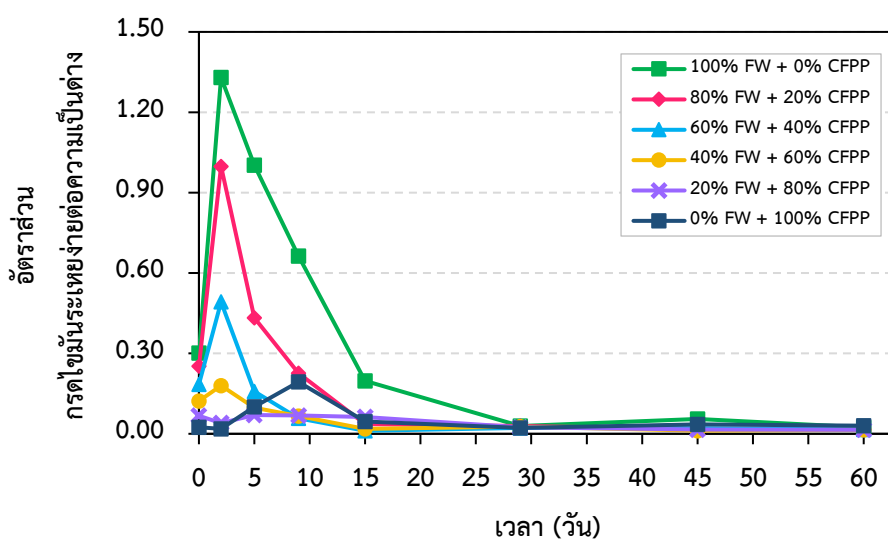
อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ได้รับการยอมรับและนิยมในการนำมาใช้ประเมินความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ เพราะการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบส่งผลให้ความเป็นต่างและค่าพีเอชลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ โดย Bernard et al. (2001) เสนอว่า หากต้องการควบคุมให้การย่อยสลายภายในระบบอยู่ในสภาวะที่สมดุล จำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างในระบบให้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.3 อยู่เสมอ เนื่องจากหากในระบบมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างสูงหรือต่ำมากจนเกินไปก็สามารถส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำกิจกรรมของกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่สร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนได้เช่นกัน ทั้งนี้ค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณระหว่างค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยง่ายกับค่าเฉลี่ยความเป็นต่าง (ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4) มีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.5

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 และ 40:60 มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างสูงในช่วงวันที่ 2 – 9 ในช่วงวันที่ 2 – 5 ในวันที่ 2 และในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย โดยมีค่าเท่ากับ 0.66 – 1.33 0.43 – 1.00 0.49 และ 0.18 ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 20:80 มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันแรกของการย่อยสลาย ไปจนกระทั่งวันที่ 15 ของการย่อยสลาย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.04 – 0.07 ในขณะที่อัตราส่วน FW/CFPP 0:100 มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างค่อนข้างต่ำในช่วง 2 วันแรกของการย่อยสลาย และมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในช่วงวันที่ 5 – 9 ของการย่อยสลาย โดยมีค่าเท่ากับ 0.10 – 0.19 แสดงให้เห็นว่า ระบบของอัตราส่วนต่าง ๆ มีความสามารถในการย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนเศษอาหารที่เพิ่มสูงขึ้น และอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 มีปริมาณความเป็นต่างไม่เพียงพอสำหรับสะเทินกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในระบบในช่วงวันดังกล่าว ในขณะที่อัตราส่วน FW/CFPP 0:100 ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพรจจุอาหารเพียงอย่างเดียวต้องใช้ระยะเวลาในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเป็นระยะเวลาหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างที่เพิ่มสูงขึ้น ก็ไม่ส่งผลกระทบรุนแรงจนทำให้ระบบเกิดความล้มเหลว แต่จะส่งผลให้ระดับพีเอชภายในระบบเสียสมดุลเล็กน้อยและทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 ในช่วงวันดังกล่าวมีอัตราการผลิตที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่มีอัตราการผลิตลดลงด้วยเช่นกัน (หัวข้อที่ 4.2.2 ภาพที่ 4.7 (ก) และตารางที่ 4.8) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างในระบบของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ก็ลดลงทันทีหลังจากเกิดในปริมาณ

สูงสุด รวมถึงมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 29 ของการย่อยสลาย จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย แสดงให้เห็นว่า สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ในระบบได้เกิดการย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย และกรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมอยู่ภายในระบบก็ถูกเปลี่ยนไปเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกือบทั้งหมด สังเกตได้จากค่าปริมาณความเป็นต่างที่สูงกว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายอย่างชัดเจนนั่นเอง

ภาพที่ 4.4

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบ เดิมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



ตารางที่ 4.5

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบ เดิมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	0.30	1.33	1.00	0.66	0.20	0.03	0.06	0.02
FW/CFPP 80:20	0.25	1.00	0.43	0.23	0.04	0.03	0.02	0.02
FW/CFPP 60:40	0.18	0.49	0.16	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02
FW/CFPP 40:60	0.12	0.18	0.10	0.07	0.02	0.03	0.01	0.02
FW/CFPP 20:80	0.07	0.04	0.07	0.07	0.06	0.02	0.02	0.01
FW/CFPP 0:100	0.02	0.02	0.10	0.19	0.05	0.02	0.04	0.03

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางได้จากการคำนวณระหว่างค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหยง่ายและค่าเฉลี่ยความเป็นต่าง

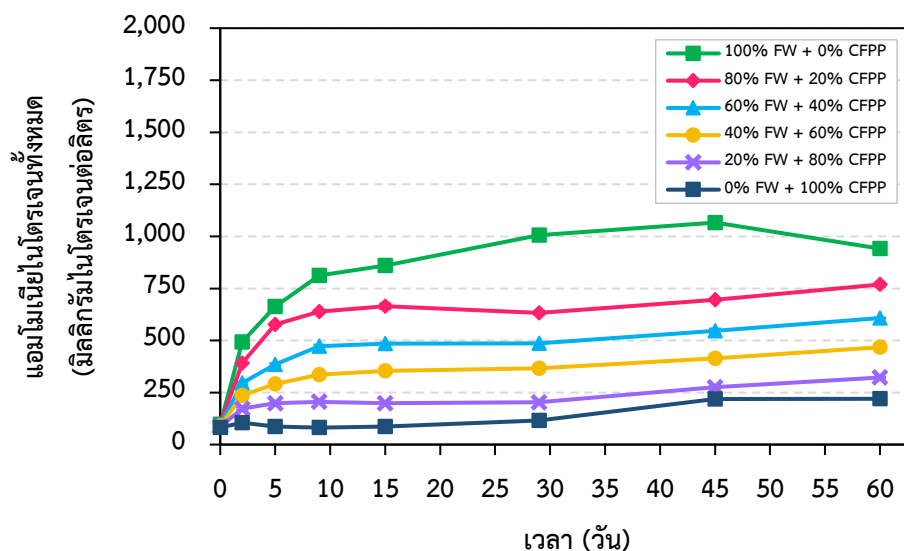
5) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด

สำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมักมีแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดเกิดขึ้นเป็นปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุดมไปด้วยโปรตีน ทั้งนี้แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะถูกใช้เป็นที่แหล่งอาหารให้กับจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนต่อไป หากภายในระบบมีการสะสมของแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถช่วยต้านทานความเป็นกรดต่างของระบบได้ แต่ในทางกลับกัน หากมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดสะสมในระบบมากเกินไป ก็จะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนและเกิดความไม่เสถียรขึ้นภายในระบบ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 จะเห็นว่า ทุกอัตราส่วนมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดสะสมในระบบตั้งแต่ 82 – 1,066 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) ตามคำแนะนำของ McCarty (1964) ทั้งนี้ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดดังกล่าวมีปริมาณต่ำกว่าการศึกษาของ Chen et al. (2014) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและขยะอินทรีย์ มีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดประมาณ 4,200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลาย ส่งผลให้มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนรายวันลดลงตามปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนภายในระบบ

ภาพที่ 4.5

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมไซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



ตารางที่ 4.6

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติม
โซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	98 ± 6	492 ± 14	664 ± 6	813 ± 13	859 ± 5	1,006 ± 8	1,066 ± 11	942 ± 5
FW/CFPP 80:20	98 ± 6	391 ± 0	577 ± 3	639 ± 8	664 ± 13	633 ± 9	696 ± 7	769 ± 10
FW/CFPP 60:40	94 ± 0	295 ± 6	385 ± 6	473 ± 8	484 ± 5	487 ± 0	547 ± 11	608 ± 2
FW/CFPP 40:60	90 ± 0	236 ± 0	292 ± 0	336 ± 0	354 ± 3	367 ± 0	414 ± 13	468 ± 5
FW/CFPP 20:80	86 ± 0	173 ± 6	199 ± 6	205 ± 5	199 ± 3	203 ± 0	276 ± 7	322 ± 5
FW/CFPP 0:100	82 ± 0	105 ± 0	87 ± 3	81 ± 5	86 ± 3	116 ± 0	220 ± 6	220 ± 2

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

6) ซีโอดีละลาย

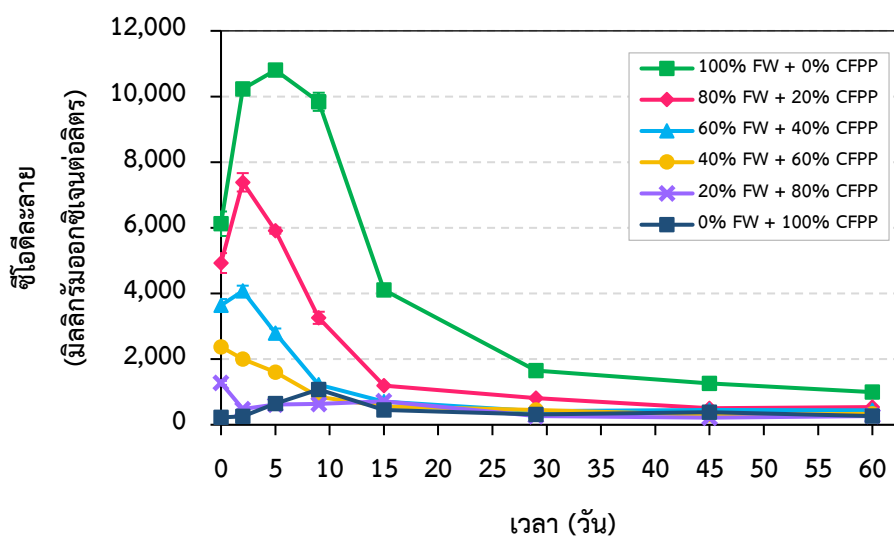
ปริมาณซีโอดีละลายจัดเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่แสดงถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่โดยอาศัยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซิส (Hydrolytic bacteria) ให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กซึ่งอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้ง่ายมากยิ่งขึ้นโดยผ่านการทำกิจกรรมของกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของซีโอดีละลาย ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 มีปริมาณซีโอดีละลายเริ่มต้นเท่ากับ 6,123 4,926 3,642 2,373 1,275 และ 223 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ซีโอดีละลายในระบบมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของเศษอาหารที่เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Suarez et al. (2022) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและขยะจากสวน/สวนสาธารณะ มีปริมาณซีโอดีละลายเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนเศษอาหารที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีปริมาณซีโอดีละลายประมาณ 2,000 – 6,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ทั้งนี้อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 มีปริมาณซีโอดีละลายเพิ่มสูงมากขึ้นจากระดับซีโอดีละลายเริ่มต้น ในวันที่ 2 – 9 (ประมาณ 9,800 – 10,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร) ในวันที่ 2 – 5 (ประมาณ 6,000 – 7,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร) และในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย (ประมาณ 4,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร) ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 40:60 20:80 และ 0:100 มีปริมาณซีโอดีละลายเริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายไม่สูงมากนัก (ประมาณ 200 – 2,300 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อ

ลิตร) เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 60:40 บ่งชี้ได้ว่า อัตราส่วนที่ประกอบด้วยสัดส่วนของเศษอาหารที่มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 60 มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีกว่าอัตราส่วนที่ประกอบด้วยสัดส่วนของเศษอาหารที่น้อยกว่าร้อยละ 60 ส่งผลให้มีการสะสมของซีโอดีละลายในระบบสูงกว่าตามสัดส่วนของเศษอาหารที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (ภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.3) ที่พบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น/ลดลงตามสัดส่วนของเศษอาหารที่เพิ่มสูงขึ้น/น้อยลงด้วยเช่นกัน

ภาพที่ 4.6

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



ตารางที่ 4.7

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	ซีโอดีละลาย (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	6,123 ± 373	10,229 ± 187	10,802 ± 93	9,839 ± 277	4,108 ± 23	1,653 ± 16	1,255 ± 9	994 ± 19
FW/CFPP 80:20	4,926 ± 303	7,386 ± 281	5,914 ± 93	3,257 ± 184	1,193 ± 12	811 ± 14	503 ± 0	538 ± 0
FW/CFPP 60:40	3,642 ± 187	4,073 ± 164	2,792 ± 140	1,215 ± 31	701 ± 5	415 ± 0	453 ± 4	442 ± 4
FW/CFPP 40:60	2,373 ± 19	1,999 ± 125	1,603 ± 47	854 ± 104	561 ± 0	445 ± 6	300 ± 2	334 ± 2
FW/CFPP 20:80	1,275 ± 61	477 ± 5	615 ± 75	632 ± 37	714 ± 5	260 ± 0	215 ± 0	267 ± 2
FW/CFPP 0:100	223 ± 6	259 ± 6	644 ± 0	1,075 ± 9	446 ± 46	316 ± 8	378 ± 62	269 ± 7

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2.2 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (Daily methane) ที่เกิดขึ้นจากการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ที่สภาวะมาตรฐาน ตลอดระยะเวลา 60 วัน มีลักษณะและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนแสดงดังภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ตามลำดับ

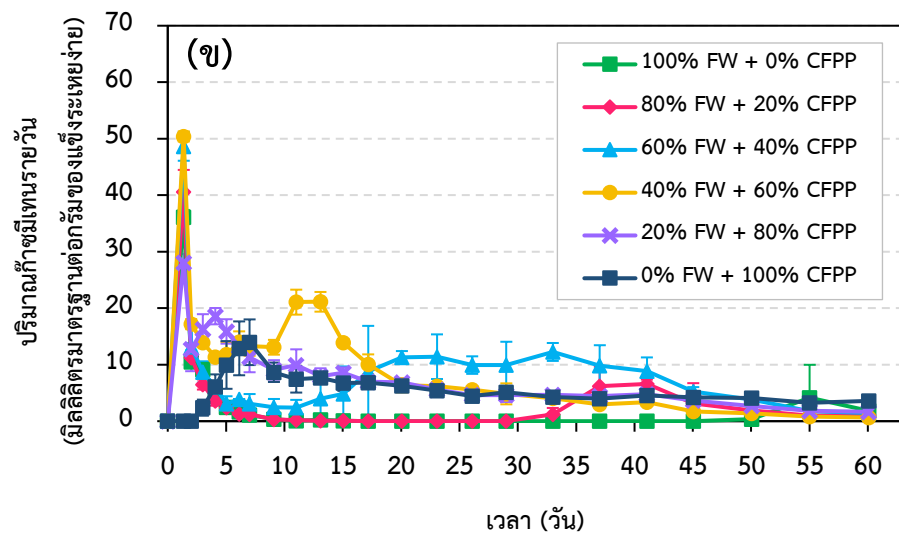
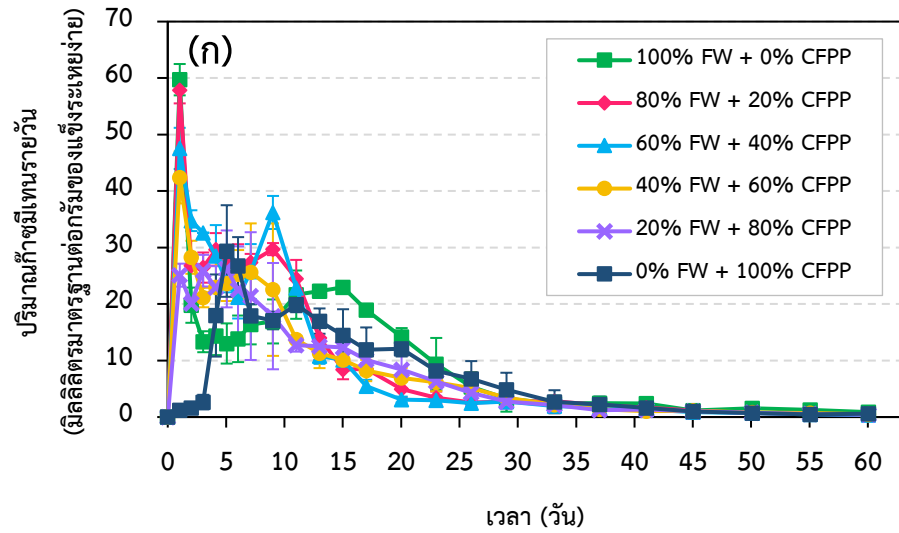
จากภาพที่ 4.7 (ก) และตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นตั้งแต่วันแรกของการหมัก และเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุด ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 0:100 เริ่มสังเกตเห็นก๊าซมีเทนเกิดขึ้นในวันแรกของการหมักเพียงเล็กน้อย และมีปริมาณสูงสุดในวันที่ 5 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า เศษอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสูงจึงเกิดการย่อยสลายกลายเป็นก๊าซมีเทนได้อย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร มีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ระบบต้องอาศัยการปรับตัวเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงสามารถสร้างก๊าซมีเทนได้ นอกจากนี้สัดส่วนของเศษอาหารก็มีผลต่อการสร้างก๊าซมีเทน โดยอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 80:20 ซึ่งมีสัดส่วนของเศษอาหารสูงกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดใกล้เคียงกันคือ 59.71 ± 2.77 และ 57.84 ± 2.33 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และเป็นอัตราที่สูงมากกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ซึ่งมีสัดส่วนของเศษอาหารไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป (ร้อยละ 40 – 60) คิดเป็น 1.2 – 1.4 เท่า รวมถึงเป็นอัตราที่สูงกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 20:80 และ 0:100 ซึ่งมีสัดส่วนของเศษอาหารน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 20 คิดเป็น 2.0 – 2.2 เท่า นอกจากนี้อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนในอัตราที่สูงกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 20:80 และ 0:100 คิดเป็น 1.4 – 1.8 เท่า

อย่างไรก็ตาม การเกิดก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 ลดลงทันทีหลังจากเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุด โดยอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 40:60 ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 3 ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 6 ในขณะที่อัตราส่วน FW/CFPP 80:20 และ 20:80 มีการเกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น/ลดลงเล็กน้อยในปริมาณค่อนข้างคงที่จนกระทั่งวันที่ 9 และ 5 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาดังกล่าวระบบอาจอยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุล แต่ไม่ได้อยู่ในระดับที่รุนแรงจนระบบไม่สามารถสร้างก๊าซมีเทนได้ ดังเช่นการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารโดยไม่มีการใช้พีเอชบัฟเฟอร์เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ข) และตารางที่ 4.9 ที่พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 80:20 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุดตั้งแต่วันแรกของการหมัก แต่ก็ลดลงทันทีอย่างต่อเนื่องหลังจากเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุด และไม่มีการเกิดขึ้นของก๊าซมีเทนในช่วงวันที่ 17 – 45 และในช่วงวันที่ 17 – 26 ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 0:100 ไม่

มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเลยในช่วง 2 วันแรกของการหมัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Abdulkarim and Mohammed Evuti (2010) ที่พบว่า การย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่เป็นเศษอาหารเพียงอย่างเดียว โดยไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ส่งผลให้ระบบสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้แค่ช่วง 5 วันแรกของการย่อยสลายเท่านั้น หลังจากนั้นระบบได้เกิดความล้มเหลว เนื่องจากภายในระบบมีระดับพีเอชลดต่ำลงจนมีสถานะเป็นกรด (พีเอช 4.8 – 5.0) และการศึกษาของ Chen et al. (2015) ที่พบว่า การย่อยสลายเศษอาหารเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการใช้พีเอชบัฟเฟอร์ ไม่มีการเกิดขึ้นของก๊าซมีเทนในช่วง 25 วันแรกของการกระบวนการย่อยสลาย จากกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี ในข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายโดยไม่มีการใช้พีเอชบัฟเฟอร์ อาจส่งผลให้ระบบมีการผลิตก๊าซมีเทนลดน้อยลงและเกิดความล้มเหลวได้ในที่สุด โดยเฉพาะอัตราส่วนซึ่งประกอบด้วยสัดส่วนของเศษอาหารในปริมาณที่มากขึ้น จะได้รับผลกระทบรุนแรงเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน แต่สำหรับการศึกษานี้ (FW/CFPP) มีการเติมพีเอชบัฟเฟอร์ในรูปของโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นระบบจึงสามารถผลิตก๊าซมีเทนต่อไปได้ แต่มีอัตราการผลิตที่ลดลง ทั้งนี้ความไม่สมดุลของระบบที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากการย่อยสลายของเศษอาหารซึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ในทั้ง 5 อัตราส่วน ได้ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเป็นปริมาณมากขึ้น ทำให้ระดับพีเอชของระบบเสียสมดุล จึงส่งผลยับยั้งการสร้างมีเทนในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ (Brown & Li, 2013) และเป็นไปได้ว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 ซึ่งมีสัดส่วนของเศษอาหารเพียงอย่างเดียวได้รับผลกระทบที่รุนแรงกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 จากสัดส่วนของเศษอาหารที่มีปริมาณสูงกว่า จึงส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลงต่ำกว่า ต่อมาปริมาณก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 60:40 และ 40:60 ได้เพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ในช่วงวันที่ 3 – 15 ในช่วงวันที่ 6 – 9 และในช่วงวันที่ 3 – 9 ตามลำดับ แต่จะเห็นได้ว่าในช่วงวันที่ 3 – 11 อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 มีการผลิตก๊าซมีเทนในอัตราที่สูงกว่า FW/CFPP 100:0 และ 40:60 กล่าวคือ มีปริมาณอยู่ในช่วง 21 – 36 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมากกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 40:60 ประมาณร้อยละ 59 – 67 และประมาณร้อยละ 41 – 54 แสดงว่า ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 เกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 40:60 และตั้งแต่วันที่ 15 9 9 7 5 และ 5 ของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ตามลำดับ เริ่มมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 45 (น้อยกว่า 2 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายในวันที่ 60

ภาพที่ 4.7

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร
ที่สถานะมาตรฐาน (ก) เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ 4.8

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ (การ

ทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	0.00	59.71 ± 2.77	19.80 ± 3.12	13.33 ± 1.85	14.37 ± 3.40	13.02 ± 3.56	13.85 ± 4.12	16.40 ± 3.54	16.92 ± 3.89	21.66 ± 4.28	22.27 ± 1.13	22.95 ± 0.74			
FW/CFPP 80:20	0.00	57.84 ± 2.33	26.79 ± 0.70	26.46 ± 2.67	29.68 ± 2.88	27.87 ± 1.39	26.39 ± 4.20	27.39 ± 1.49	29.73 ± 1.07	24.49 ± 3.32	14.02 ± 3.91	8.38 ± 1.69			
FW/CFPP 60:40	0.00	47.55 ± 3.64	34.76 ± 1.84	32.62 ± 0.00	28.53 ± 5.45	23.78 ± 1.71	21.20 ± 3.76	25.75 ± 4.86	36.21 ± 2.93	22.87 ± 1.55	10.78 ± 1.36	10.10 ± 1.16			
FW/CFPP 40:60	0.00	42.41 ± 4.60	28.28 ± 2.92	21.15 ± 1.72	22.98 ± 4.53	23.62 ± 3.08	25.26 ± 4.29	25.61 ± 8.67	22.56 ± 11.73	13.75 ± 0.65	11.32 ± 2.66	10.12 ± 1.59			
FW/CFPP 20:80	0.00	25.12 ± 2.03	20.12 ± 1.35	25.91 ± 2.80	22.92 ± 3.78	26.22 ± 6.81	22.53 ± 7.69	21.41 ± 11.31	17.86 ± 9.41	12.73 ± 1.15	12.54 ± 1.41	12.31 ± 2.37			
FW/CFPP 0:100	0.00	1.19 ± 0.27	1.63 ± 0.31	2.65 ± 1.29	17.97 ± 7.27	29.39 ± 8.11	26.74 ± 5.11	17.95 ± 2.04	17.09 ± 1.56	19.88 ± 1.32	16.98 ± 2.24	14.46 ± 4.62			
อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60				
FW/CFPP 100:0	18.93 ± 0.58	14.21 ± 1.54	9.40 ± 4.60	5.36 ± 2.57	3.27 ± 2.31	2.43 ± 1.36	2.47 ± 0.49	2.43 ± 0.89	1.14 ± 0.37	1.52 ± 0.60	1.27 ± 0.49	0.87 ± 0.18			
FW/CFPP 80:20	8.53 ± 1.01	4.97 ± 1.49	3.41 ± 1.09	2.56 ± 1.10	2.75 ± 0.92	2.82 ± 0.54	2.11 ± 0.69	1.68 ± 0.46	1.17 ± 0.11	0.72 ± 0.10	0.57 ± 0.07	0.56 ± 0.11			
FW/CFPP 60:40	5.47 ± 1.13	3.10 ± 0.52	2.98 ± 0.37	2.45 ± 0.70	2.73 ± 0.19	1.92 ± 0.38	1.68 ± 0.53	1.31 ± 0.22	0.87 ± 0.24	0.72 ± 0.21	0.50 ± 0.15	0.37 ± 0.29			
FW/CFPP 40:60	8.23 ± 1.88	6.93 ± 1.77	6.13 ± 1.56	5.15 ± 2.72	3.45 ± 1.83	2.17 ± 0.85	1.41 ± 0.46	1.02 ± 0.14	1.10 ± 0.40	0.83 ± 0.17	0.69 ± 0.28	0.48 ± 0.36			
FW/CFPP 20:80	10.12 ± 1.39	8.40 ± 3.35	6.30 ± 2.54	4.30 ± 2.34	2.73 ± 1.26	2.13 ± 1.14	1.22 ± 0.75	1.31 ± 0.45	1.02 ± 0.70	0.78 ± 0.28	0.55 ± 0.25	0.43 ± 0.28			
FW/CFPP 0:100	11.91 ± 3.96	12.08 ± 1.36	8.17 ± 0.35	6.75 ± 3.15	4.86 ± 2.98	2.71 ± 2.04	2.23 ± 1.39	1.61 ± 0.90	0.96 ± 0.56	0.68 ± 0.14	0.50 ± 0.24	0.60 ± 0.58			

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.9

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (ปริมาณมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	0.00	36.13 ± 1.26	10.50 ± 0.63	9.16 ± 1.26	5.24 ± 1.18	2.43 ± 0.66	1.64 ± 0.35	1.11 ± 0.28	0.38 ± 0.06	0.09 ± 0.00	0.25 ± 0.24	0.09 ± 0.00			
FW/CFPP 80:20	0.00	40.59 ± 3.89	11.24 ± 0.51	6.49 ± 0.89	3.58 ± 0.83	2.40 ± 0.22	1.28 ± 0.38	1.24 ± 0.23	0.28 ± 0.18	0.22 ± 0.22	0.08 ± 0.00	0.06 ± 0.05			
FW/CFPP 60:40	0.00	48.62 ± 2.52	13.17 ± 0.63	8.71 ± 1.89	6.08 ± 0.00	3.09 ± 1.32	3.87 ± 0.00	3.11 ± 1.70	2.48 ± 1.46	2.38 ± 1.39	4.00 ± 3.59	4.86 ± 4.82			
FW/CFPP 40:60	0.00	50.40 ± 0.89	17.18 ± 0.89	13.90 ± 0.51	11.36 ± 0.48	11.83 ± 2.16	13.99 ± 1.91	13.31 ± 1.73	13.08 ± 1.31	21.07 ± 2.21	21.13 ± 1.74	13.88 ± 0.69			
FW/CFPP 20:80	0.00	28.04 ± 1.60	12.73 ± 3.88	16.27 ± 2.67	18.59 ± 1.44	15.88 ± 2.16	13.17 ± 1.26	11.31 ± 2.65	9.08 ± 1.71	9.91 ± 2.81	7.98 ± 1.38	8.58 ± 0.95			
FW/CFPP 0:100	0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	2.40 ± 1.42	6.08 ± 2.21	9.95 ± 4.22	12.89 ± 4.77	13.97 ± 4.04	8.65 ± 1.71	7.42 ± 2.35	7.69 ± 0.50	6.76 ± 1.39			
อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (ปริมาณมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60				
FW/CFPP 100:0	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.35 ± 0.50	4.13 ± 5.85	1.83 ± 2.59				
FW/CFPP 80:20	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.03 ± 0.05	1.20 ± 1.14	6.18 ± 3.74	6.58 ± 0.78	3.13 ± 3.60	1.89 ± 0.70	0.98 ± 0.55				
FW/CFPP 60:40	8.78 ± 8.09	11.32 ± 1.09	11.42 ± 3.95	9.93 ± 1.55	9.91 ± 4.15	12.26 ± 1.59	9.80 ± 3.64	8.88 ± 2.41	5.24 ± 0.80	3.84 ± 0.00	1.76 ± 0.25				
FW/CFPP 40:60	10.07 ± 1.75	6.36 ± 1.25	6.21 ± 0.24	5.56 ± 0.27	4.84 ± 1.86	4.05 ± 0.91	2.98 ± 0.30	3.39 ± 0.28	1.74 ± 0.37	1.38 ± 0.48	0.80 ± 0.52				
FW/CFPP 20:80	6.99 ± 0.64	6.87 ± 0.64	5.55 ± 0.69	4.63 ± 1.03	4.64 ± 1.23	4.65 ± 0.34	4.43 ± 1.00	4.76 ± 0.44	3.66 ± 0.73	2.71 ± 0.22	1.82 ± 0.58				
FW/CFPP 0:100	6.85 ± 1.11	6.25 ± 1.09	5.43 ± 1.09	4.45 ± 0.73	5.15 ± 1.10	4.28 ± 1.01	3.97 ± 0.98	4.54 ± 0.83	4.23 ± 0.81	4.13 ± 0.40	3.25 ± 0.81				

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2.3 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม (Cumulative methane yields) ที่เกิดขึ้นจากการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุกาอาหารในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ที่สภาวะมาตรฐาน ตลอดระยะเวลา 60 วัน มีลักษณะและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนแสดงดังภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.10 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.8 (ก) และตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาลักษณะการเติบโตของเส้นกราฟผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของทั้ง 6 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio) เท่ากับ 12 14 18 25 45 และ 460 ตามลำดับ จะเห็นว่า การย่อยสลายของทั้ง 6 อัตราส่วน มีลักษณะที่เป็นปกติ สอดคล้องกับลักษณะทางเคมีกายภาพของตัววัสดุตั้งต้น กล่าวคือ อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 เป็นวัสดุตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ง่าย จึงสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ทันที ส่วนอัตราส่วน FW/CFPP 0:100 เป็นวัสดุตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ยากกว่า จึงต้องการระยะเวลาในการปรับตัวก่อนการผลิตก๊าซมีเทน (Filer et al., 2019)

นอกจากนี้ก็ไม่พบว่ามีกรยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนที่รุนแรงเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลายของทั้ง 6 อัตราส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 20:80 และ 0:100 ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำกว่า/สูงกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม (C/N ratio = 20 – 30) สำหรับกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและแอมโมเนียในปริมาณมากจนส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบหรือเกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนได้ ทั้งนี้การไม่เกิดการยับยั้ง จากผลกระทบดังที่กล่าวมาในระบบการย่อยสลายของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 20:80 และ 0:100 ก็เป็นเพราะการมีอยู่ของไซโตเดียมไบคาร์เนตที่ช่วยรักษาความเป็นต่างของระบบให้คงอยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย จึงสามารถป้องกันความล้มเหลวในการผลิตก๊าซมีเทนไม่ให้เกิดขึ้นได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุกาอาหารโดยไม่มีการใช้พีเอชบัฟเฟอร์ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ข) และตารางที่ 4.11 พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 และ 0:100 มีการยับยั้งการสร้างมีเทนอย่างรุนแรงในช่วงวันที่ 17 – 45 ในช่วงวันที่ 17 – 26 และในช่วงวันที่ 1 – 2 ของการย่อยสลาย ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมน้อยกว่าการหมักร่วมแบบเติมไซโตเดียมไบคาร์บอเนตในอัตราส่วนเดียวกัน คิดเป็นร้อยละ 80 67 และ 22 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lee et al. (2019) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารเศษใบไม้ และกากตะกอน โดยไม่เติมไซโตเดียมไบคาร์บอเนต ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมน้อยกว่าการหมักแบบเติมไซโตเดียมไบคาร์บอเนต คิดเป็นร้อยละ 37 ส่วนการหมักแบบเติม/ไม่เติม

โซเดียมไบคาร์บอเนตของอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยต่างกันไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งเป็นไปได้ว่า ลักษณะทางเคมีกายภาพของตัววัสดุตั้งต้นและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถช่วยให้การหมักแบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ใกล้เคียงกับการหมักร่วมแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในอัตราส่วนเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Abdulkarim and Mohammed Evuti (2010) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและขยะอินทรีย์แบบเติม/ไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในอัตราส่วน FW/GW 50:50 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมต่างกันไม่เกินร้อยละ 5

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 505.87 ± 7.89 474.88 ± 15.34 451.23 ± 13.29 420.35 ± 11.13 392.35 ± 5.15 และ 393.28 ± 9.23 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 ภายในระยะเวลา 23 17 15 20 20 และ 23 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าการศึกษาของ Chen et al. (2014) ที่พบว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 50 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 409.8 389.4 388.8 390.2 324.7 และ 270.9 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่างวัสดุตั้งต้น 2 ชนิด (FW/CFPP 20:80) กับการหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นวัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียว (FW/CFPP 0:100) ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในลักษณะที่สูงกว่า (C/N ratio = 45 และ 460 ตามลำดับ) ช่วงที่เหมาะสม พบว่า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย อัตราส่วน FW/CFPP 20:80 มีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมค่อนข้างใกล้เคียงกับอัตราส่วน FW/CFPP 0:100 แต่มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าในช่วง 25 วันแรกของการย่อยสลาย และมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่า เป็นระยะเวลา 3 วัน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักโดยใช้เศษอาหารเพียงชนิดเดียว (FW/CFPP 100:0) กับการหมักร่วมระหว่างวัสดุตั้งต้น 2 ชนิด (FW/CFPP 80:20) ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในลักษณะที่ต่ำกว่า (C/N ratio = 12 และ 14 ตามลำดับ) ช่วงที่เหมาะสม โดยมองข้ามผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 ที่สูงมากกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 80:20 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 7 ก็จะทำให้เห็นว่า ในช่วงวันที่ 1 – 20 ของอัตราส่วน FW/CFPP 80:20 มีเส้นกราฟที่ชันมากกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน

FW/CFPP 80:20 มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่า และให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่า เป็นระยะเวลา 6 วัน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมของอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับอัตราส่วน FW/CFPP 0:100 จะเห็นว่า อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าตลอดระยะเวลาของการหมัก ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงมากกว่า คิดเป็นร้อยละ 15 และ 7 ตามลำดับ และมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่า เป็นระยะเวลา 8 และ 3 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ระบบไม่ต้องการระยะเวลาปรับตัวสำหรับการย่อยสลาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร อัตราส่วน 60:40 และ 40:60 ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 18 และ 25 ตามลำดับ ส่งผลดีต่อการผลิตก๊าซมีเทนทั้งในด้านอัตราเร็วและปริมาณการผลิตที่สูงกว่าการหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียวซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงถึง 460

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 กับการหมักร่วมของอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 โดยมองข้ามผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 ที่สูงมากกว่า FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 12 และ 20 ตามลำดับ ก็จะทำให้เห็นว่าอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่า เป็นระยะเวลา 8 และ 3 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ในช่วงวันที่ 1 – 20 และในช่วงวันที่ 1 – 13 ของอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ตามลำดับ มีเส้นกราฟที่ชันมากกว่า แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงมากกว่า ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีลักษณะส่งเสริมซึ่งกันและกันในทางบวกต่อการกระบวนการย่อยสลาย และทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีกว่า ทั้งนี้การหมักร่วมโดยไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ข) และตารางที่ 4.11 ก็ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การหมักร่วมในอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 18 และ 25 ตามลำดับ สามารถช่วยให้การหมักดำเนินต่อไปได้และมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักโดยใช้วัสดุตั้งต้นเพียงชนิดเดียวหรือการหมักร่วมในอัตราส่วนอื่น ๆ โดยอัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนใกล้เคียงกัน และมีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 20:80 และ 0:100 ตลอดระยะเวลาของการหมัก โดยให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงมากกว่าประมาณ 4.4 2.8 1.2 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ อัตราส่วน FW/CFPP 40:60 ก็มีอัตราเร็วในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 20:80 และ 0:100 ในช่วง 40 วันแรกของการย่อย

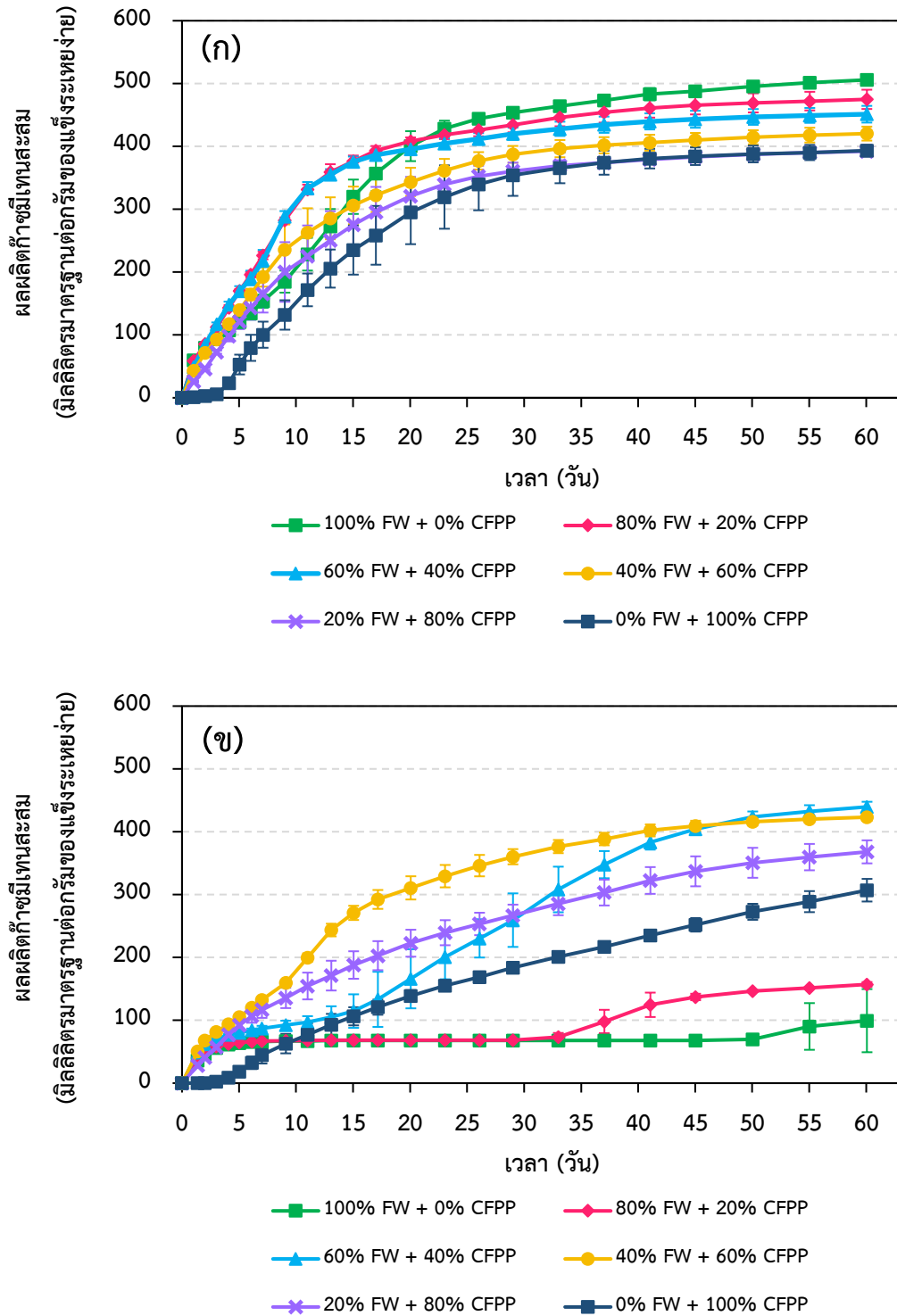
สลายอย่างชัดเจน และมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 เร็วกว่า เป็นระยะเวลา 24 15 11 11 และ 19 วัน ตามลำดับ

ด้วยการศึกษาี้เป็นการศึกษาการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารซึ่งมีการควบคุมระบบโดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต และเมื่อพิจารณาข้อมูลของผลการศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อัตราเร็วในการย่อยสลาย และผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม รวมถึงระยะเวลาในการปรับตัว (λ) และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (μ_m) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์ จึงสรุปได้ว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร อัตราส่วน 60:40 มีความเหมาะสมมากที่สุดต่อการนำไปใช้ในการศึกษา อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในลำดับถัดไป



ภาพที่ 4.8

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร
ที่สภาวะมาตรฐาน (ก) เติมโซ่เติมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เติมโซ่เติมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ 4.10

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาพแวดล้อมแบบเดิมเขียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริตรมมาตฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	0.00	59.70 ± 2.76	79.71 ± 5.99	93.17 ± 4.36	107.51 ± 5.54	120.67 ± 6.64	134.48 ± 9.01	153.66 ± 10.38	184.88 ± 17.55	228.49 ± 26.06	273.04 ± 27.28	319.89 ± 27.35			
FW/CFPP 80:20	0.00	58.75 ± 1.79	85.61 ± 1.97	112.48 ± 0.92	143.51 ± 3.86	170.07 ± 2.68	196.10 ± 4.47	226.37 ± 6.02	282.55 ± 4.48	331.29 ± 7.92	359.33 ± 12.33	376.33 ± 9.11			
FW/CFPP 60:40	0.00	49.03 ± 2.38	83.70 ± 3.15	117.19 ± 2.75	148.29 ± 4.77	169.85 ± 7.78	190.58 ± 11.64	217.86 ± 17.45	288.33 ± 8.77	333.48 ± 9.79	355.08 ± 8.71	375.40 ± 8.47			
FW/CFPP 40:60	0.00	43.02 ± 3.61	71.37 ± 4.92	92.87 ± 2.86	117.23 ± 4.73	139.62 ± 5.20	164.46 ± 8.99	192.28 ± 15.45	235.59 ± 40.22	262.99 ± 38.59	285.61 ± 33.36	306.13 ± 29.93			
FW/CFPP 20:80	0.00	25.91 ± 1.38	45.98 ± 1.70	72.61 ± 2.51	98.05 ± 8.33	121.40 ± 12.13	143.32 ± 19.32	165.23 ± 29.62	200.20 ± 47.46	225.32 ± 48.85	250.43 ± 46.47	275.23 ± 42.24			
FW/CFPP 0:100	0.00	1.19 ± 0.27	2.84 ± 0.37	5.50 ± 0.95	23.36 ± 8.16	52.90 ± 15.73	79.47 ± 20.76	100.37 ± 20.78	131.78 ± 23.42	171.71 ± 26.07	205.60 ± 30.31	235.06 ± 39.09			
อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริตรมมาตฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
FW/CFPP 100:0	357.14 ± 28.34	400.38 ± 23.81	428.11 ± 12.83	444.13 ± 8.34	453.90 ± 6.47	464.17 ± 7.86	473.40 ± 6.32	483.14 ± 9.70	487.65 ± 8.36	495.48 ± 6.31	501.58 ± 8.63	505.87 ± 7.89			
FW/CFPP 80:20	393.20 ± 7.44	408.31 ± 6.00	418.39 ± 6.79	426.08 ± 9.92	434.35 ± 11.95	446.11 ± 14.07	454.15 ± 16.32	460.91 ± 15.06	465.60 ± 14.68	469.26 ± 15.19	472.08 ± 14.82	474.88 ± 15.34			
FW/CFPP 60:40	386.29 ± 6.42	395.70 ± 7.95	404.55 ± 8.31	411.89 ± 9.30	420.12 ± 9.65	427.99 ± 11.34	434.51 ± 12.91	439.76 ± 12.77	443.23 ± 13.51	446.86 ± 12.54	449.35 ± 11.89	451.23 ± 13.29			
FW/CFPP 40:60	322.40 ± 26.86	343.47 ± 22.54	361.60 ± 18.49	377.03 ± 13.87	387.39 ± 13.35	396.47 ± 13.68	401.83 ± 12.90	405.91 ± 12.66	410.29 ± 11.10	414.55 ± 11.22	417.97 ± 11.79	420.35 ± 11.13			
FW/CFPP 20:80	295.35 ± 40.23	320.85 ± 30.71	339.53 ± 23.69	352.42 ± 16.76	360.65 ± 13.48	369.41 ± 8.56	374.14 ± 6.45	379.39 ± 5.10	383.45 ± 3.39	387.38 ± 4.04	390.17 ± 5.35	392.35 ± 5.15			
FW/CFPP 0:100	258.51 ± 46.76	295.30 ± 50.88	319.43 ± 50.42	339.67 ± 41.32	354.24 ± 32.95	365.73 ± 24.34	374.09 ± 19.11	380.57 ± 15.62	384.39 ± 9.7	387.90 ± 13.25	390.27 ± 12.12	393.28 ± 9.23			

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.11

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาพแวดล้อมแบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งแห้ง)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	0.00	36.20 ± 1.26	46.74 ± 0.63	55.95 ± 1.90	61.58 ± 3.16	63.90 ± 3.79	65.68 ± 4.17	66.26 ± 4.99	67.05 ± 5.12	67.23 ± 5.12	67.75 ± 5.62	67.93 ± 5.62			
FW/CFPP 80:20	0.00	40.67 ± 3.90	51.96 ± 3.72	58.48 ± 3.61	62.32 ± 2.87	64.61 ± 2.95	66.01 ± 2.81	67.11 ± 2.75	67.69 ± 2.97	68.11 ± 2.95	68.27 ± 2.95	68.39 ± 3.04			
FW/CFPP 60:40	0.00	48.71 ± 2.53	61.94 ± 3.16	70.70 ± 1.26	77.22 ± 1.26	80.17 ± 2.53	84.36 ± 2.53	87.13 ± 4.05	92.30 ± 7.08	96.86 ± 9.73	105.16 ± 17.19	114.72 ± 26.67			
FW/CFPP 40:60	0.00	50.50 ± 0.89	67.75 ± 0.00	81.72 ± 0.52	93.91 ± 0.52	105.19 ± 2.37	120.36 ± 0.52	132.24 ± 1.03	159.52 ± 3.10	199.81 ± 6.71	243.66 ± 10.05	270.95 ± 11.32			
FW/CFPP 20:80	0.00	28.09 ± 1.60	40.87 ± 3.67	57.23 ± 5.54	77.16 ± 7.08	92.32 ± 9.15	106.59 ± 10.46	116.69 ± 12.82	135.62 ± 16.15	154.58 ± 21.30	171.13 ± 23.70	187.99 ± 21.85			
FW/CFPP 0:100	0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	2.41 ± 1.43	8.93 ± 2.52	18.43 ± 5.81	32.40 ± 10.05	44.89 ± 13.65	62.93 ± 15.48	77.11 ± 18.41	93.07 ± 17.13	106.35 ± 14.43			
อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งแห้ง)														
	วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
FW/CFPP 100:0	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	67.93 ± 5.62	69.68 ± 8.11	90.23 ± 37.16	99.48 ± 50.25			
FW/CFPP 80:20	68.39 ± 3.04	68.39 ± 3.04	68.39 ± 3.04	68.39 ± 3.04	68.46 ± 3.15	73.22 ± 6.67	98.11 ± 18.64	124.66 ± 19.40	137.11 ± 5.13	146.59 ± 1.68	151.44 ± 1.05	157.14 ± 3.73			
FW/CFPP 60:40	133.38 ± 43.87	166.08 ± 47.03	200.42 ± 35.14	230.37 ± 30.47	259.38 ± 42.60	308.19 ± 36.28	347.67 ± 21.62	383.49 ± 11.88	404.32 ± 8.72	423.57 ± 8.72	432.29 ± 9.99	439.63 ± 8.09			
FW/CFPP 40:60	292.35 ± 15.02	310.71 ± 18.47	329.38 ± 17.81	346.13 ± 17.05	360.31 ± 12.09	376.45 ± 10.48	388.46 ± 9.98	402.14 ± 9.56	409.05 ± 8.54	415.97 ± 6.19	419.93 ± 5.39	423.24 ± 5.82			
FW/CFPP 20:80	202.84 ± 23.14	222.69 ± 21.46	239.39 ± 19.93	253.3 ± 17.85	266.92 ± 17.16	285.45 ± 18.25	303.30 ± 20.55	322.53 ± 21.30	337.06 ± 23.84	350.65 ± 23.86	359.68 ± 20.98	368.05 ± 18.31			
FW/CFPP 0:100	120.91 ± 12.06	138.97 ± 9.07	155.31 ± 7.92	168.73 ± 7.02	183.80 ± 4.97	200.84 ± 5.90	216.84 ± 6.79	235.17 ± 8.79	251.97 ± 10.81	272.65 ± 12.75	288.83 ± 16.74	307.04 ± 18.01			

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2.4 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนในวัสดุตั้งต้นชนิดต่าง ๆ นั้น ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการเป็นจำนวนมาก (Bedoić et al., 2020; Li et al., 2018; Zahan et al., 2018) ซึ่ง Modified Gompertz model จัดเป็นโมเดลที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากมีความเหมาะสมในการนำไปใช้อธิบายถึงความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นโดยพิจารณาจากค่าการปรับตัว (λ) และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (μ_m) (Bedoić et al., 2020; Zahan et al., 2018) ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลอง (Experimental) ของอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 กับผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทำนาย (Predicted) โดยใช้ Modified Gompertz model แสดงได้ดังภาพที่ 4.9 และ 4.10 ส่วนพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์โมเดลต่าง ๆ ตลอดจนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.12

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.12 ภาพที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่า ผลการทำนายของ Modified Gompertz model ในทุกอัตราส่วน ให้ค่า R^2 ที่สูงและเข้าใกล้ 1 (0.9882 – 0.9964) และมีค่า %Error น้อยกว่าร้อยละ 10 รวมถึงมีค่า RMSE เพียง 9.36 – 13.5 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย แสดงให้เห็นว่า Modified Gompertz model ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของการศึกษานี้ได้อย่างแม่นยำเป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า λ และ μ_m ของทุกอัตราส่วน พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 มีค่า λ เท่ากับ 0.00 วัน ในขณะที่อัตราส่วน FW/CFPP 0:100 มีค่า λ เท่ากับ 2.82 วัน ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายซึ่งมีส่วนของเศษอาหารเป็นองค์ประกอบสามารถเกิดขึ้นได้ทันที ระบบไม่ต้องการการปรับตัว ($\lambda = 0.00$ วัน) เนื่องจากเศษอาหารเป็นวัสดุตั้งต้นที่มีโครงสร้างอย่างง่าย จึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ทันที ส่วนการใช้ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นวัสดุตั้งต้นเพียงอย่างเดียวนั้น ระบบต้องใช้ระยะเวลาถึง 2.82 วัน ในการปรับตัว แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากกว่า สอดคล้องกับลักษณะของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารซึ่งมีองค์ประกอบเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส โดยมีส่วนที่ย่อยสลายได้ยากเป็นองค์ประกอบ (เซลลูโลสซึ่งเป็นผลึกสูงและลิกนิน) ส่วนค่า μ_m ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 80:20 60:40 และ 40:60 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดสูงกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 คิดเป็นร้อยละ 45 47 และ 13 ตามลำดับ และสูงกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 0:100 คิดเป็นร้อยละ 60 63 และ 25

ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วน FW/CFPP 20:80 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดใกล้เคียงกับอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 และ 0:100 คิดเป็นร้อยละ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายแบบหมักร่วมได้อย่างชัดเจนมากขึ้น นั่นคือแสดงว่า การหมักร่วมในอัตราส่วนที่มีอัตราส่วนของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในสัดส่วนที่เหมาะสมจะเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วกว่าอัตราส่วนที่มีเศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเป็นองค์ประกอบเพียงอย่างเดียว จากค่าร้อยละของ μ_m ที่สูงกว่าหรือใกล้เคียงกันนั่นเอง ทั้งนี้อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ($\mu_m = 32.42$ มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย-วัน) ที่สูงมากกว่าอัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 40:60 20:80 และ 0:100 คิดเป็น 1.47 1.02 1.31 1.55 และ 1.63 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร อัตราส่วน 60:40 เกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วและระบบการย่อยสลายมีเสถียรภาพที่ดีกว่าการหมักโดยใช้เศษอาหาร/ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียวและการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารในอัตราส่วนอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงผลในเชิงบวกของการหมักร่วม (Chen et al., 2014; Macias-Corral et al., 2008)

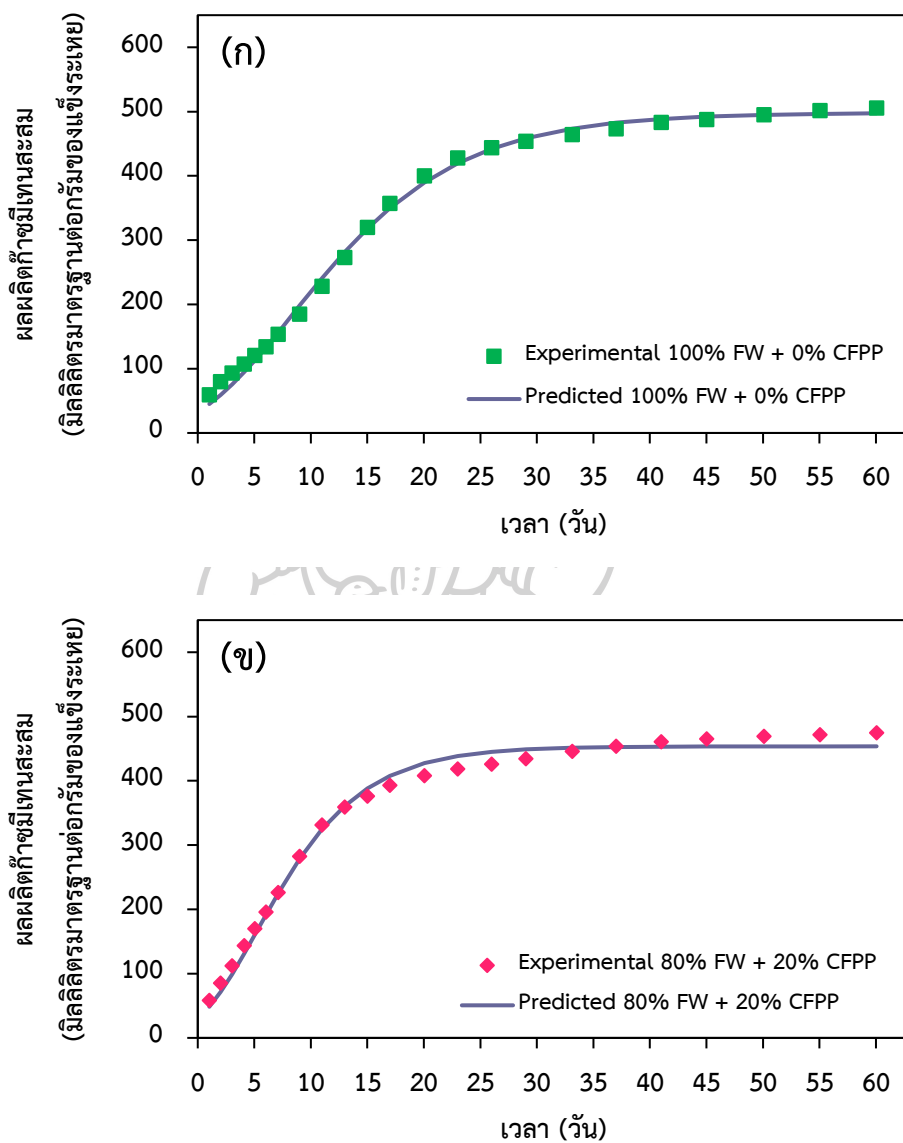
ตารางที่ 4.12

พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้โมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

FW/CFPP ratios	Y_0		μ_m (NmL gVS ⁻¹ day ⁻¹)	λ (days)	R^2	%Error	RMSE (NmL/gVS)
	Experimental (NmL/gVS)	Predicted (NmL/gVS)					
100:0	505.87	498.35	21.98	0.00	0.9964	-1.49	9.73
80:20	474.88	453.60	31.79	0.00	0.9914	-4.48	12.83
60:40	451.23	433.46	32.42	0.00	0.9923	-3.94	11.52
40:60	420.35	402.53	24.74	0.00	0.9882	-4.24	13.50
20:80	392.35	380.09	20.97	0.00	0.9937	-3.12	9.74
0:100	393.28	384.69	19.84	2.82	0.9958	-2.18	9.36

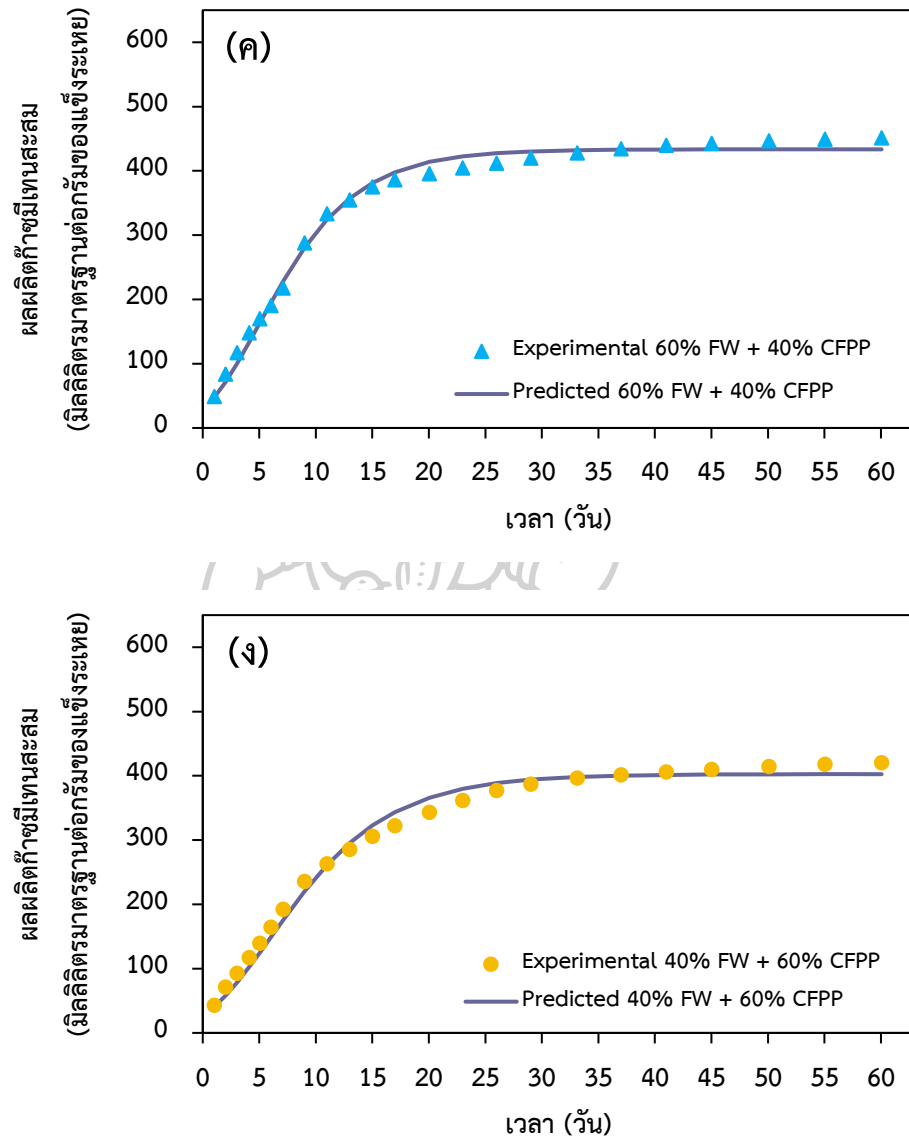
ภาพที่ 4.9

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



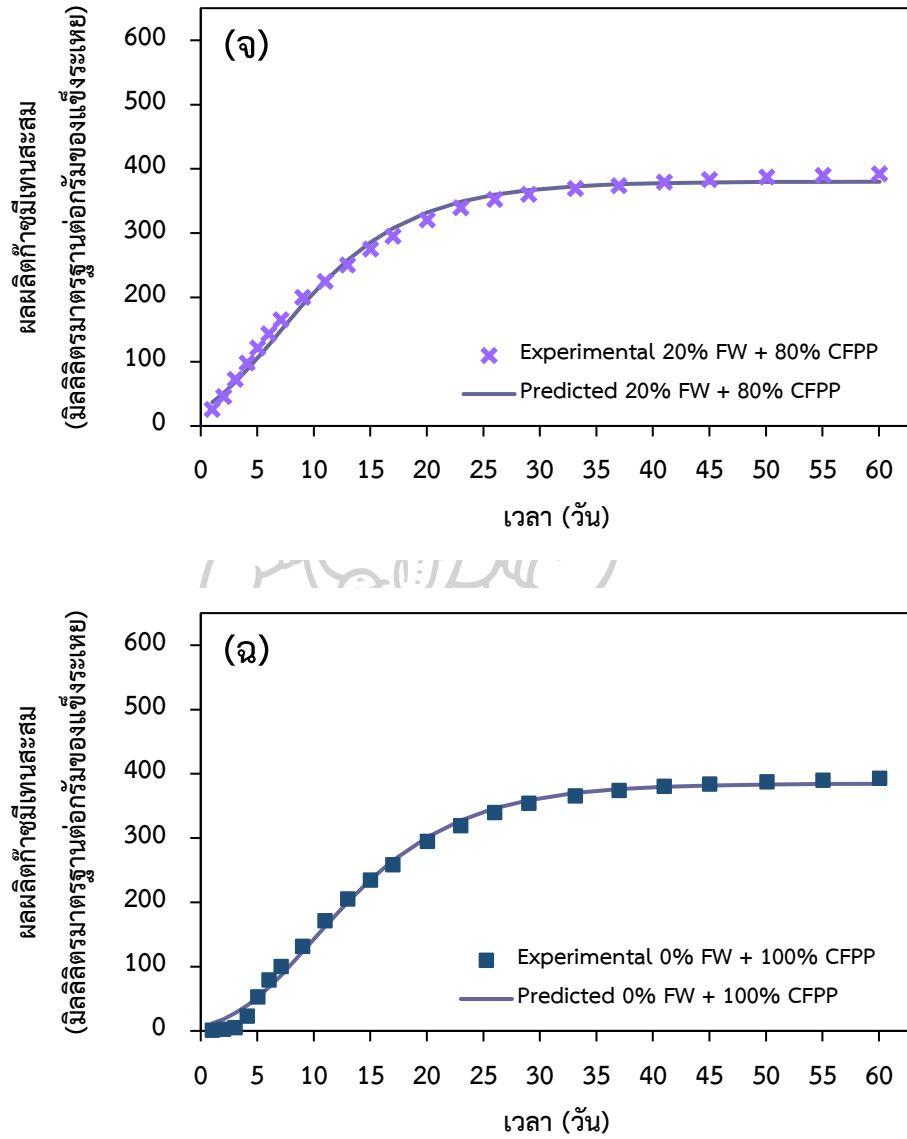
ภาพที่ 4.9

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)



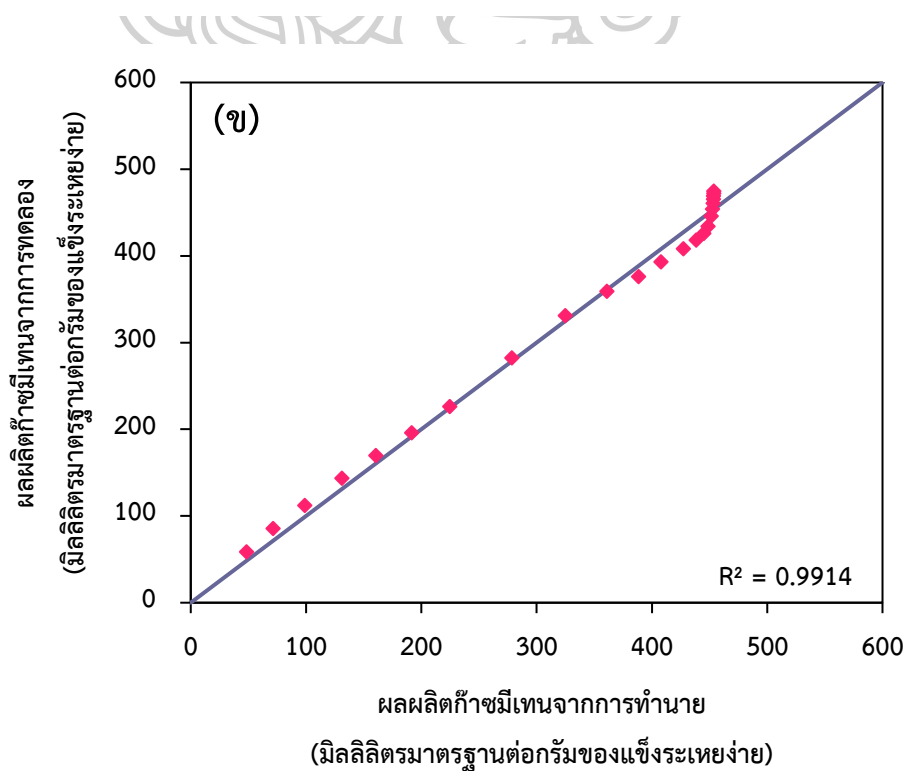
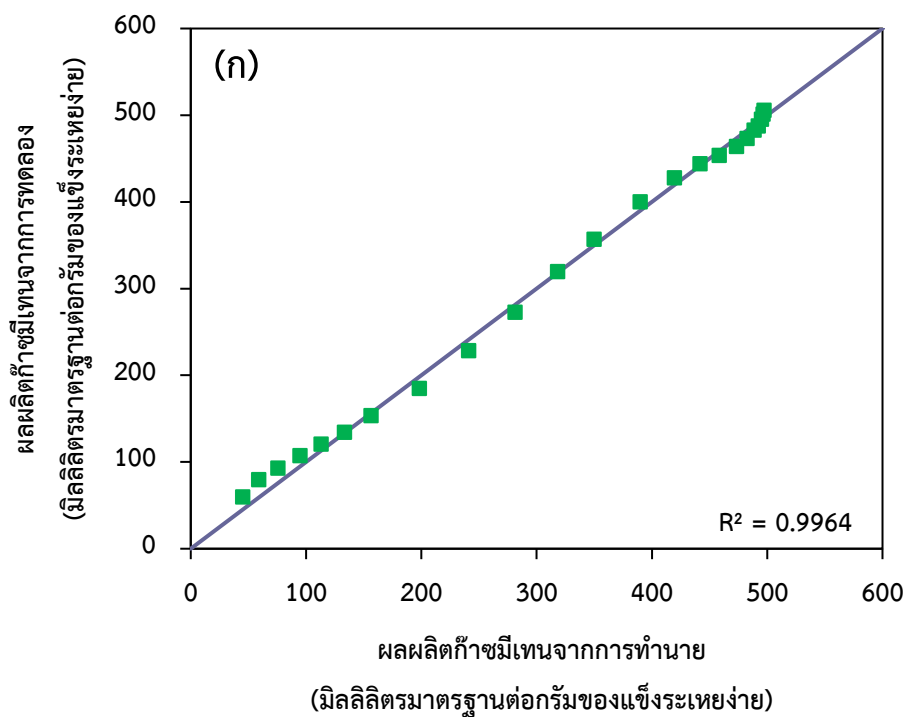
ภาพที่ 4.9

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเต็ม โขเดี่ยวไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)



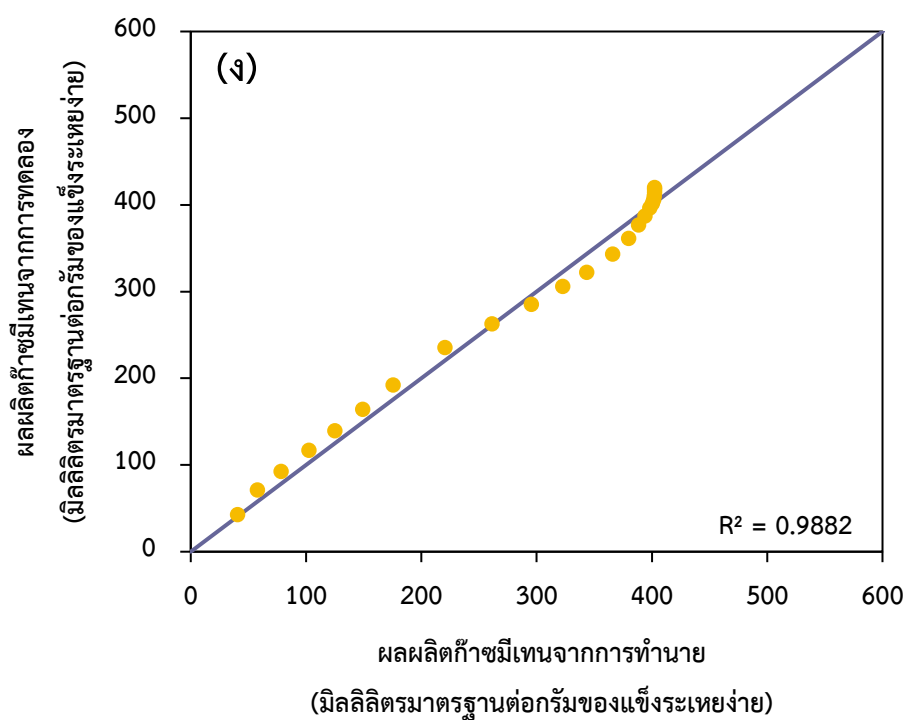
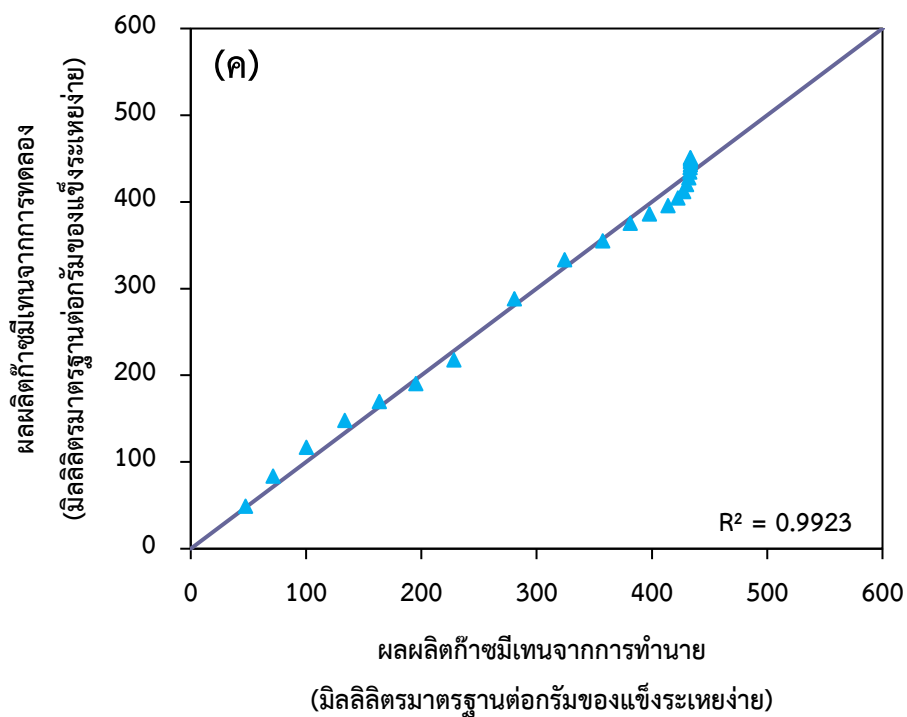
ภาพที่ 4.10

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษาแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)



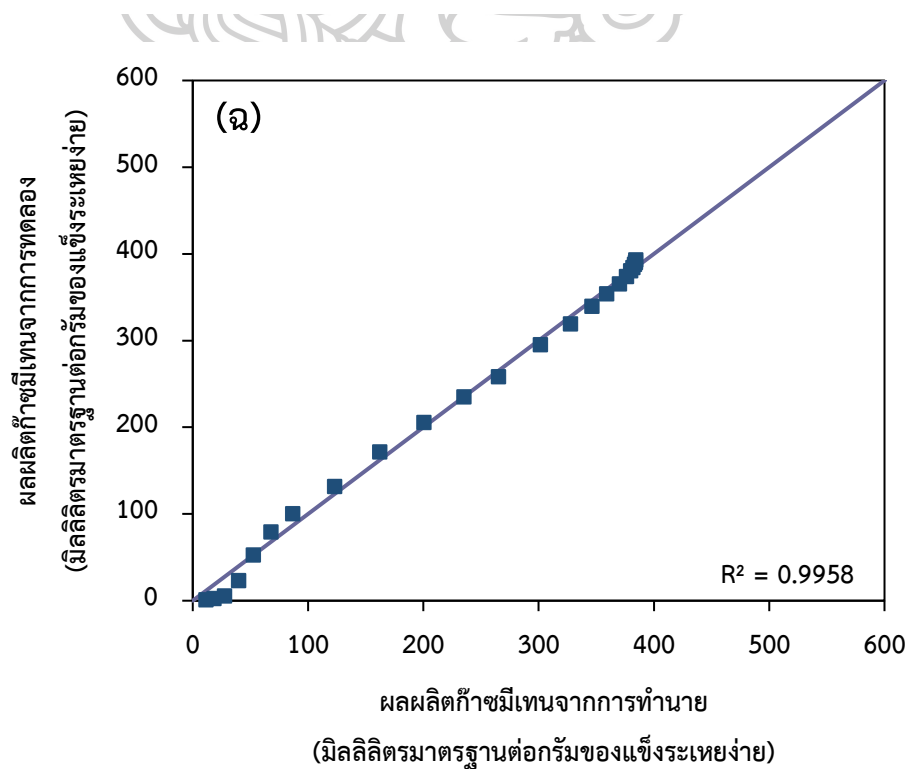
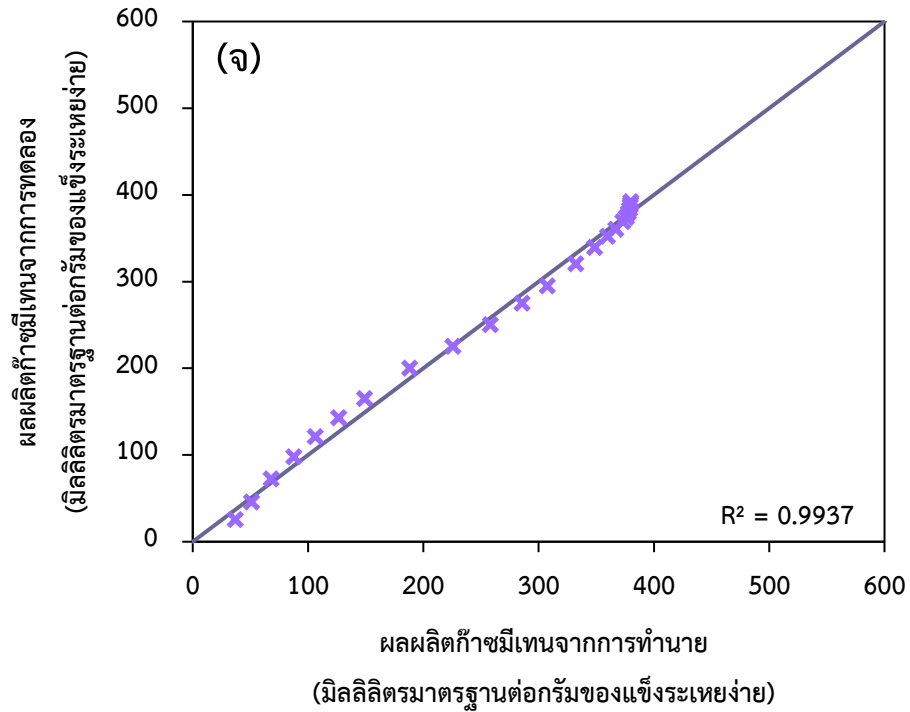
ภาพที่ 4.10

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษาแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)



ภาพที่ 4.10

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษาแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)



4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกันต่อผลผลิตก๊าซมีเทน

การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (I/S) เป็นการนำวัสดุตั้งต้นซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างเศษอาหารต่อผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายจากการทดลองชุดที่ 1 (FW/CFPP 60:40) มาทำการหมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ จำนวน 5 อัตราส่วน ด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical methane potential, BMP) ที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลา 60 วัน ซึ่งจำแนกการศึกษาของชุดการทดลองในอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น จำนวน 5 อัตราส่วน ออกเป็นด้านต่าง ๆ ได้แก่ การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม และจลนพลศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

4.3.1 การตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก

การตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายในเฟสของเหลว เป็นการนำของเหลวภายในขวดหมักมาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลาย ได้แก่ พีเอช (pH) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs) ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk) อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง (Volatile fatty acids to alkalinity ratio, VFAs/Alk ratio) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen, TAN) และซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand, SCOD) โดยดำเนินการวิเคราะห์ในวันที่ 0 2 5 9 15 29 45 และ 60 ของการย่อยสลาย ซึ่งมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ดังนี้

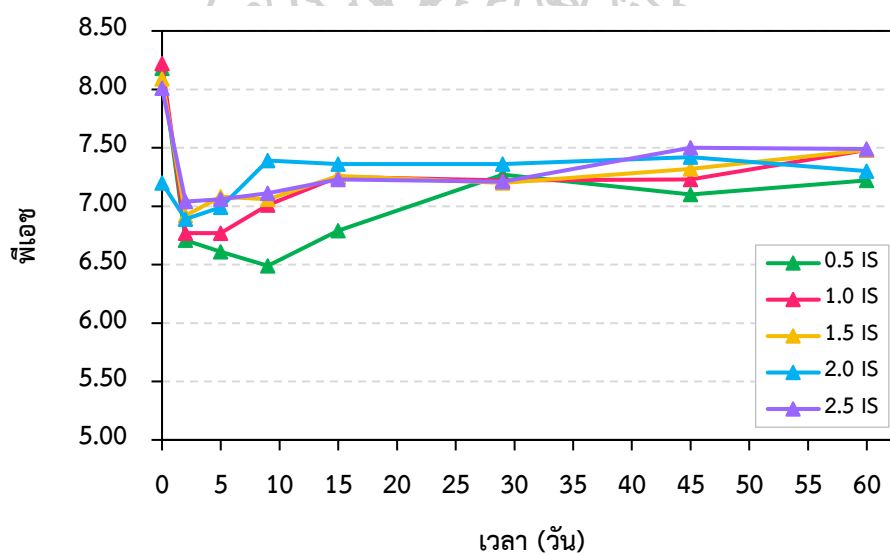
1) พีเอช

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชภายในขวดหมักของทุกอัตราส่วน ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.13 จะเห็นว่า อัตราส่วน I/S 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีค่าพีเอชเริ่มต้นตั้งแต่ 7.20 – 8.09 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม (Mao et al., 2015) ส่วนอัตราส่วน I/S 0.5:1 และ 1:1 มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงกว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมเล็กน้อย (พีเอช 8.18 – 8.22) แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลาย ทั้งนี้เมื่อการหมักเริ่มดำเนินการ พบว่า ทุกอัตราส่วนมีค่าพีเอชลดลงต่ำกว่าระดับพีเอชเริ่มต้นตามอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่น้อยลง (พีเอช 6.71 – 7.04) หลังจากนั้นภายในระบบของทุกอัตราส่วน ยกเว้นอัตราส่วน I/S 0.5:1 ต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 3 วัน ในการปรับสมดุลพีเอชให้มีความเสถียรมากขึ้น (พีเอช 6.77 – 7.49) ในขณะที่ภายในระบบของอัตราส่วน I/S 0.5:1 ต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 5 – 7 วัน ในการปรับสมดุลพีเอชให้มีความเสถียรมากขึ้น (พีเอช 6.79 – 7.22) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Gandhi et al. (2022) ที่พบว่า การย่อยสลายโดยใช้อัตราส่วน

ระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (เศษอาหาร) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน มีค่าพีเอชลดลงจากรดับพีเอชเริ่มต้นตามอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่น้อยลง จากนั้นค่าพีเอชในระบบของอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่สูงกว่าหรือเท่ากับ 1.0 ก็มีการปรับสมดุลพีเอชให้มีความเสถียรมากขึ้น ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย (พีเอช 8.23 – 8.58) ในขณะที่ภายในระบบของอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่เท่ากับหรือน้อยกว่า 0.5 มีค่าพีเอชซึ่งแสดงถึงความเป็นกรดสูง (พีเอช 5.00 – 6.00) ตั้งแต่วันที่ 6 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่สูงขึ้น/น้อยลง มีผลต่อความเสถียรของพีเอชในระบบ และส่งผลต่ออัตราการการผลิตก๊าซมีเทนด้วยเช่นกัน (หัวข้อที่ 4.3.2 ภาพที่ 4.17 (ก) และตารางที่ 4.19)

ภาพที่ 4.11

การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)



ตารางที่ 4.13

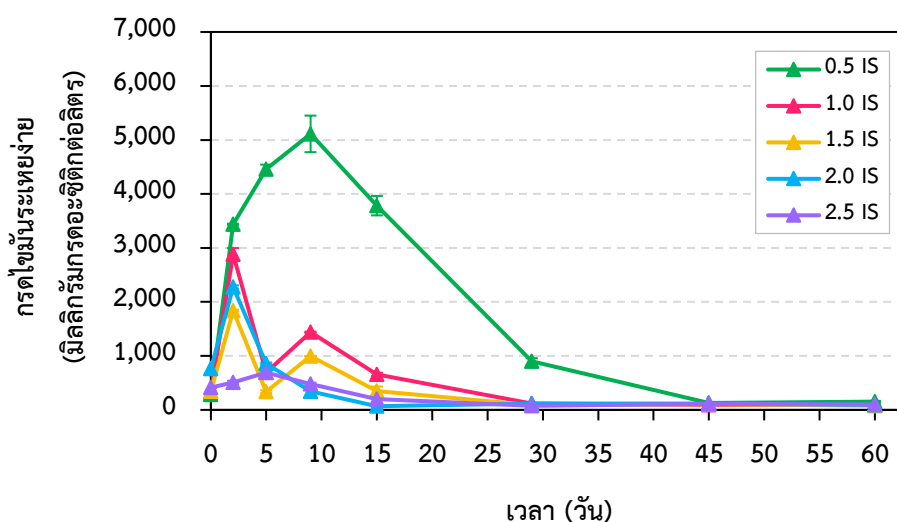
การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	พีเอช							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
V/S 0.5:1	8.18	6.71	6.61	6.49	6.79	7.27	7.10	7.22
V/S 1:1	8.22	6.77	6.77	7.01	7.25	7.22	7.23	7.48
V/S 1.5:1	8.09	6.92	7.08	7.06	7.26	7.20	7.32	7.48
V/S 2:1	7.20	6.89	6.99	7.39	7.36	7.36	7.42	7.30
V/S 2.5:1	8.01	7.04	7.06	7.11	7.23	7.21	7.50	7.49

สิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cheng and Zhong (2014) ที่พบว่า การย่อยสลายของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (มูลสุกรและก้านฝ้าย) ในอัตราส่วน 0.2:1 0.25:1 0.3:1 และ 0.5:1 มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมค่อนข้างคงที่ในวันที่ 12 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ในขณะที่อัตราส่วน 0.1:1 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมค่อนข้างคงที่ในวันที่ 20 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มสูงขึ้น/น้อยลง มีผลต่อการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ และยังส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซมีเทนด้วยเช่นกัน (หัวข้อที่ 4.3.2 ภาพที่ 4.17 (ก) และตารางที่ 4.19)

ภาพที่ 4.12

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมเชื้อเดิมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)



ตารางที่ 4.14

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมเชื้อเดิมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	กรดไขมันระเหยง่าย (มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
V/S 0.5:1	284 ± 10	3,439 ± 10	4,460 ± 82	5,112 ± 339	3,783 ± 180	898 ± 60	129 ± 1	151 ± 16
V/S 1:1	325 ± 21	2,882 ± 115	693 ± 41	1,438 ± 11	659 ± 30	116 ± 9	91 ± 9	90 ± 9
V/S 1.5:1	343 ± 3	1,839 ± 15	336 ± 25	992 ± 6	346 ± 87	87 ± 29	104 ± 13	78 ± 11
V/S 2:1	766 ± 3	2,277 ± 29	856 ± 20	343 ± 109	68 ± 35	120 ± 6	118 ± 30	94 ± 1
V/S 2.5:1	411 ± 4	510 ± 30	691 ± 28	480 ± 24	202 ± 6	75 ± 15	113 ± 3	101 ± 3

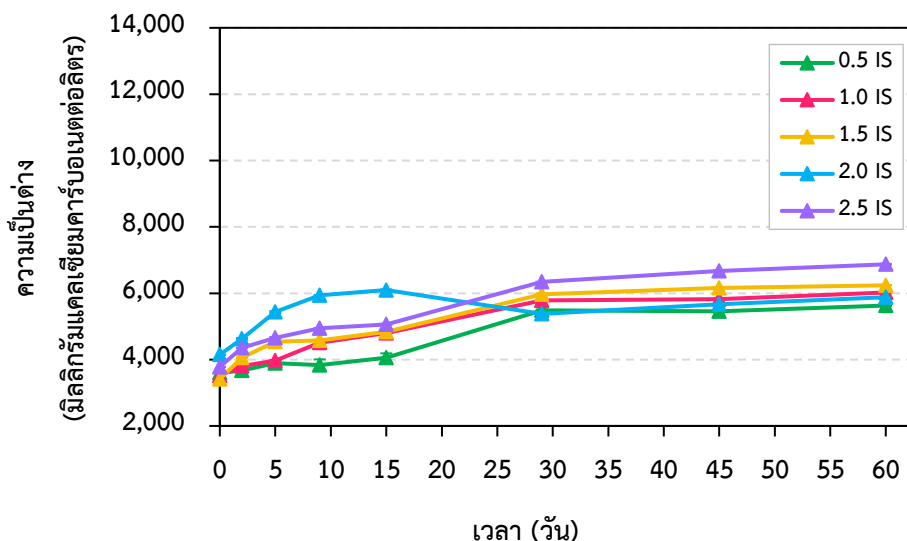
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3) ความเป็นต่าง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่าง ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.13 และตารางที่ 4.15 จะเห็นว่า ทุกอัตราส่วนมีปริมาณความเป็นต่าง เริ่มต้นประมาณ 3,400 – 4,100 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (1,000 – 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร) (McCarty, 1964) สำหรับสะเทินกรดไขมัน ละเอียด และเพียงพอสำหรับด้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ตลอดระยะเวลาการหมัก 60 วัน แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 และ 1.5:1 มีปริมาณความเป็นต่างเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ในวันที่ 29 ของการย่อยสลาย ส่วนอัตราส่วน 2:1 และ 2.5:1 มีปริมาณความเป็นต่างเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ในวันที่ 5 และ 15 ของการย่อยสลาย ตามลำดับ และทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 30 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความ เป็นต่างในช่วงวันดังกล่าว ก็เป็นผลมาจากภายในระบบมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดซึ่งได้ จากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (ภาพที่ 4.14 และตารางที่ 4.16) ที่พบว่า ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดที่สะสมอยู่ในระบบมี แนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย และมีปริมาณค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 30 ไป จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย จึงส่งผลให้ระบบมีความเป็นต่างเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ พบว่า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีปริมาณ ความเป็นต่างเท่ากับ 5,629 6,022 5,880 และ 6,872 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าการศึกษาของ Gandhi et al. (2022) ที่พบว่า การย่อยสลายของ อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (เศษอาหาร) 0.25:1 0.5:1 1:1 2:1 และ 4:1 มีปริมาณ ความเป็นต่างเท่ากับ 3,800 6,600 12,000 6,100 และ 3,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อ ลิตร ตามลำดับ

ภาพที่ 4.13

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)



ตารางที่ 4.15

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
I/S 0.5:1	3,599 ± 6	3,671 ± 10	3,893 ± 47	3,830 ± 175	4,059 ± 130	5,487 ± 25	5,451 ± 7	5,629 ± 7
I/S 1:1	3,520 ± 6	3,808 ± 26	3,974 ± 5	4,505 ± 45	4,801 ± 17	5,788 ± 13	5,818 ± 34	6,022 ± 7
I/S 1.5:1	3,409 ± 6	4,061 ± 16	4,536 ± 5	4,573 ± 28	4,837 ± 0	5,965 ± 38	6,156 ± 20	6,238 ± 0
I/S 2:1	4,148 ± 13	4,627 ± 27	5,434 ± 28	5,935 ± 0	6,096 ± 19	5,376 ± 6	5,666 ± 21	5,880 ± 0
I/S 2.5:1	3,781 ± 6	4,354 ± 0	4,654 ± 26	4,945 ± 11	5,064 ± 17	6,341 ± 6	6,668 ± 20	6,872 ± 14

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

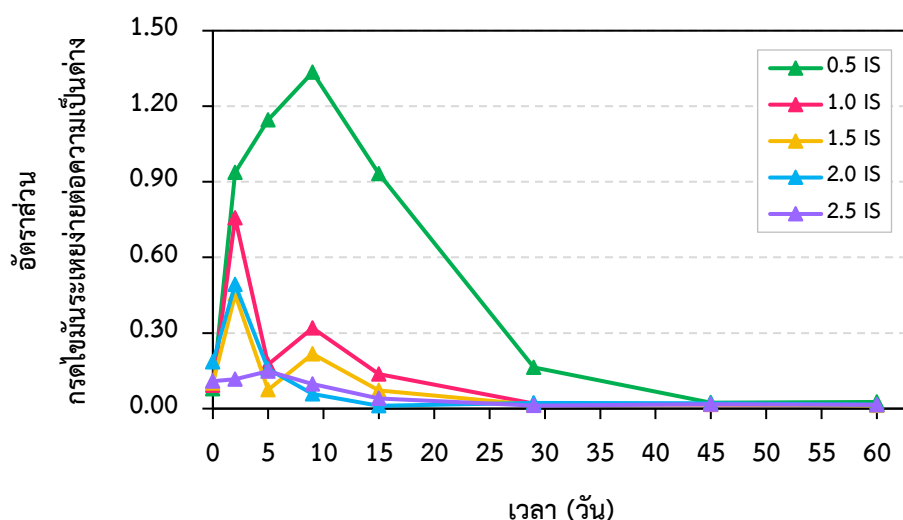
4) อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.14 และตารางที่ 4.16 จะเห็นว่า อัตราส่วน I/S 2.5:1 มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างสูงไม่เกิน 0.3 ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย ตามคำแนะนำของ Bernard et al. (2001) ส่วนอัตราส่วน I/S 1:1 1.5 และ 2:1 มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างสูงในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย (0.76 0.45 และ 0.49 ตามลำดับ) ในขณะที่อัตราส่วน 0.5:1 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างสูงมาก ในช่วงวันที่ 2 – 15 (VFAs/Alk ratio = 0.93 – 1.33) แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน I/S 2.5:1 มีปริมาณความเป็นต่างในระบบที่เพียงพอสำหรับสะเทินกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย ส่วนอัตราส่วน I/S 1:1 1.5 และ 2:1 มีปริมาณความเป็นต่างไม่เพียงพอสำหรับสะเทินกรดไขมันระเหย

ง่ายที่เกิดขึ้นในระบบในช่วงวันดังกล่าว แต่ก็ไม่ส่งผลกระทบบรรุนแรงจนทำให้ระบบเกิดความล้มเหลว เนื่องด้วยอัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบสูงกว่าหรือเท่ากับปริมาณวัสดุตั้งต้น (1.0 – 1.5 เท่า) ทำให้ระบบมีอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนสูง และเพียงพอต่อการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้กลายเป็นก๊าซมีเทนได้ต่อไป ในขณะที่อัตราส่วน 0.5:1 แม้ว่าจะมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงของพีเอชและรักษา ระดับของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก็ตาม แต่เนื่องด้วยอัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบน้อยกว่าปริมาณวัสดุตั้งต้น (0.5 เท่า) จึงทำให้ระบบมีอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนค่อนข้างช้าและไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ส่งผลให้ระบบของอัตราส่วน 0.5:1 มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างสูงกว่าอัตราส่วน I/S 1:1 1.5 2:1 และ 2.5:1 อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มสูงขึ้น/น้อยลง มีผลต่อประสิทธิภาพการทำกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในระบบ และส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงหรือต่ำด้วยเช่นกัน (หัวข้อที่ 4.3.2 ภาพที่ 4.17 (ก) และตารางที่ 4.19) อย่างไรก็ตาม ทุกอัตราส่วนมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างลดลงทันทีหลังจากเกิดในปริมาณสูงสุด รวมถึงมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 29 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ยกเว้นอัตราส่วน I/S 0.5:1 ที่มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างค่อนข้างคงที่ในวันที่ 45 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย

ภาพที่ 4.14

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)



ตารางที่ 4.16

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่างตลอดระยะเวลาการหมักแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
V/S 0.5:1	0.08	0.94	1.15	1.33	0.93	0.16	0.02	0.03
V/S 1:1	0.09	0.76	0.17	0.32	0.14	0.02	0.02	0.01
V/S 1.5:1	0.10	0.45	0.07	0.22	0.07	0.01	0.02	0.01
V/S 2:1	0.18	0.49	0.16	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02
V/S 2.5:1	0.11	0.12	0.15	0.10	0.04	0.01	0.02	0.01

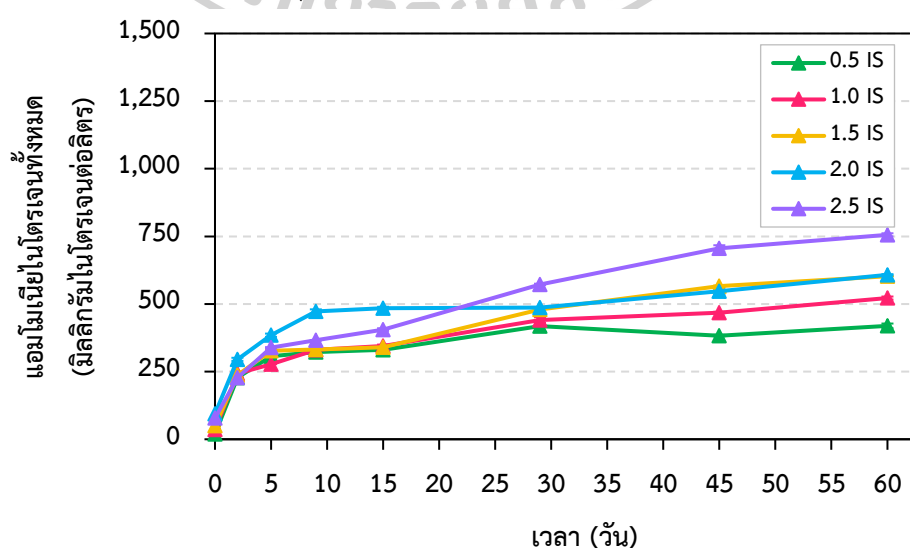
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางได้จากการคำนวณระหว่างค่าเฉลี่ยกรดไขมันระเหยง่ายและค่าเฉลี่ยความเป็นต่าง

5) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.15 และตารางที่ 4.17 จะเห็นว่า ทุกอัตราส่วนมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดสะสมในระบบตลอดระยะเวลาการหมักตั้งแต่ 20 - 756 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลาย (ไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) ตามคำแนะนำของ McCarty (1964)

ภาพที่ 4.15

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)



ตารางที่ 4.17

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติม
โซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
I/S 0.5:1	20 ± 2	227 ± 0	307 ± 7	322 ± 9	330 ± 7	418 ± 0	383 ± 3	419 ± 9
I/S 1:1	37 ± 2	243 ± 0	278 ± 0	330 ± 2	345 ± 5	440 ± 11	468 ± 3	522 ± 6
I/S 1.5:1	50 ± 2	237 ± 0	328 ± 4	332 ± 5	340 ± 2	479 ± 3	566 ± 3	603 ± 0
I/S 2:1	94 ± 0	295 ± 6	385 ± 6	473 ± 8	484 ± 5	487 ± 0	547 ± 11	608 ± 2
I/S 2.5:1	78 ± 0	227 ± 9	338 ± 2	366 ± 0	406 ± 5	572 ± 3	706 ± 11	756 ± 6

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

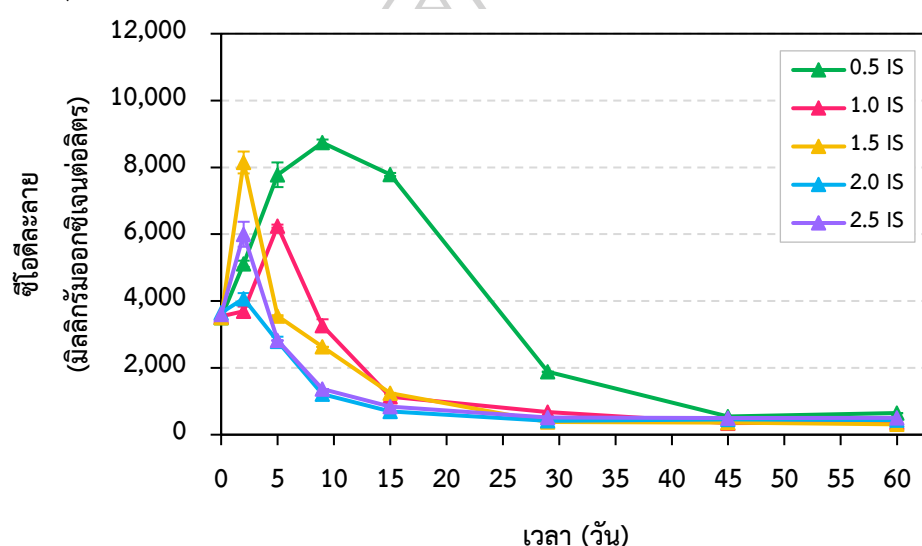
6) ซีโอดีละลาย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของซีโอดีละลาย ตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.18 จะเห็นว่า อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีปริมาณซีโอดีละลายเริ่มต้นค่อนข้างใกล้เคียงกันประมาณ 3,500 – 3,600 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร เป็นผลมาจากทุกอัตราส่วนมีวัสดุตั้งต้นเริ่มต้นในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งได้แก่ ปริมาณเศษอาหาร ร้อยละ 60 และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารร้อยละ 40 และเมื่อการหมักเริ่มดำเนินการ พบว่า อัตราส่วน I/S 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีปริมาณซีโอดีละลายสะสมสูงเพียง 5 วันแรกของการย่อยสลาย รวมถึงมีปริมาณซีโอดีละลายสูงสุดเท่ากับ 6,241 8,146 4,073 และ 5,997 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร และเมื่อปริมาณซีโอดีละลายเพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุดก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 29 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ส่วนอัตราส่วน I/S 0.5:1 มีปริมาณซีโอดีละลายสะสมสูง 15 วันแรกของการย่อยสลาย รวมถึงมีปริมาณซีโอดีละลายสูงสุดเท่ากับ 8,739 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร และเมื่อปริมาณซีโอดีละลายเพิ่มขึ้นถึงระดับสูงสุดก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 45 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย แสดงให้เห็นว่า ทุกอัตราส่วนมีความสามารถในการย่อยสลายค่อนข้างดี แต่อัตราส่วน I/S 0.5:1 มีการสะสมของซีโอดีละลายในระบบนานกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ เนื่องด้วยอัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบน้อยกว่าปริมาณวัสดุตั้งต้น (0.5 เท่า) จึงส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซิส ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (ภาพที่ 4.12 และตารางที่ 4.14) ที่พบว่า อัตราส่วน I/S 0.5 มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงวันที่ 2 – 9 ของการย่อยสลาย ในขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ มีปริมาณกรดไขมัน

ระเหยง่ายลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 2 ของการย่อยสลาย ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับผลการศึกษา ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (หัวข้อ 4.3.2 ภาพที่ 4.17 และตารางที่ 4.19) ที่พบว่า อัตราส่วน I/S 0.5 มี อัตราการผลิตก๊าซมีเทนค่อนข้างต่ำและคงที่ในช่วงวันที่ 2 – 9 ของการย่อยสลาย (ประมาณ 3 – 13 มิลลิกรัมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย) ในขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทน ค่อนข้างใกล้เคียงกันในช่วงวันดังกล่าว (ประมาณ 16 – 47 มิลลิกรัมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)

ภาพที่ 4.16

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีไอทีละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)



ตารางที่ 4.18

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีไอทีละลายตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	ซีไอทีละลาย (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
I/S 0.5:1	3,507 ± 35	5,114 ± 94	7,779 ± 369	8,739 ± 94	7,787 ± 46	1,882 ± 0	545 ± 5	644 ± 0
I/S 1:1	3,540 ± 12	3,693 ± 140	6,241 ± 46	3,266 ± 188	1,141 ± 81	676 ± 5	346 ± 2	366 ± ± 2
I/S 1.5:1	3,499 ± 23	8,146 ± 327	3,553 ± 23	2,628 ± 0	1,242 ± 9	383 ± 9	358 ± 0	310 ± 2
I/S 2:1	3,642 ± 187	4,073 ± 164	2,792 ± 140	1,215 ± 31	701 ± 5	415 ± 0	453 ± 4	442 ± 4
I/S 2.5:1	3,597 ± 93	5,997 ± 374	2,818 ± 0	1,368 ± 0	836 ± 5	519 ± 0	498 ± 6	501 ± 5

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.3.2 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (Daily methane) ที่เกิดขึ้นจากการหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (FW/CFPP 60:40) ในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 ที่สภาวะมาตรฐาน ตลอดระยะเวลา 60 วัน มีลักษณะและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนแสดงดังภาพที่ 4.17 และตารางที่ 4.19 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.17 (ก) และตารางที่ 4.19 จะเห็นว่า อัตราส่วน อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุดตั้งแต่วันแรกของการหมัก เท่ากับ 19.29 ± 1.00 26.88 ± 1.87 35.75 ± 2.48 47.56 ± 3.63 และ 52.60 ± 8.11 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ma et al. (2019) ที่พบว่า การย่อยสลายของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (ฟางข้าวและมูลโคนม) ในอัตราส่วน 0.25:1 0.3:1 0.5:1 1:1 และ 1.5:1 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเป็นปริมาณสูงสุดประมาณ 6 7 10 17 และ 20 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนที่ประกอบด้วยหัวเชื้อจุลินทรีย์ในปริมาณสูงขึ้นไปจะมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนได้ในปริมาณที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ อัตราส่วน I/S 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีการเกิดก๊าซมีเทนลดลงทันทีหลังจากมีการเกิดในปริมาณสูงสุด และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนค่อนข้างคงที่ในช่วงวันที่ 2 – 11 ของการย่อยสลาย ในขณะที่อัตราส่วน I/S 0.5 1 มีการเกิดก๊าซมีเทนลดลงทันทีหลังจากมีการเกิดในปริมาณสูงสุด และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนค่อนข้างต่ำ/คงที่ในช่วงวันที่ 3 – 9 ของการย่อยสลาย จะเห็นได้ว่าในช่วงวันที่ 3 – 9 ของอัตราส่วน I/S 0.5:1 มีการผลิตก๊าซมีเทนในอัตราที่ต่ำกว่าอัตราส่วน I/S 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 กล่าวคือ มีปริมาณอยู่ในช่วง 3 – 6 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำกว่าอัตราส่วน I/S 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 ประมาณร้อยละ 30 – 50 50 – 60 50 – 60 และ 50 – 70 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาดังกล่าวระบบอาจอยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุล โดยระบบที่มีอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นต่ำกว่าจะได้รับผลกระทบรุนแรงกว่าระบบที่มีอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นสูงกว่า แต่ไม่ได้อยู่ในระดับที่รุนแรงจนระบบไม่สามารถสร้างก๊าซมีเทนได้ ดังเช่น การย่อยสลายของอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นโดยไม่มีการใช้พีเอชบัฟเฟอร์เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.17 (ข) และตารางที่ 4.20 ซึ่งพบว่าอัตราส่วน I/S 0.5:1 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนค่อนข้างต่ำ/ไม่ผลิตก๊าซเลยในวันที่ 6 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ส่วนอัตราส่วน I/S 1:1 และ 1.5:1 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนค่อนข้างต่ำ/ไม่ผลิตก๊าซเลยในช่วงวันที่ 5 – 33 ในขณะที่อัตราส่วน 2:1 และ 2.5:1 ได้รับผลกระทบเป็นระยะเวลาสั้น ๆ และสามารถดำเนินการย่อยสลายต่อไปได้ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มสูงขึ้นสามารถช่วยให้ระบบมีความสมดุลและมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Ma et al. (2019) ที่พบว่า การย่อยสลายของอัตราส่วนระหว่าง

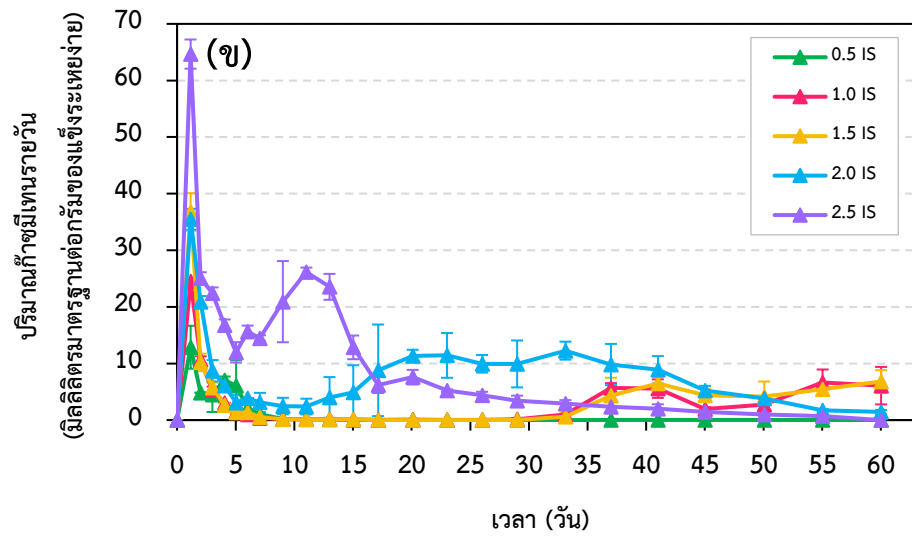
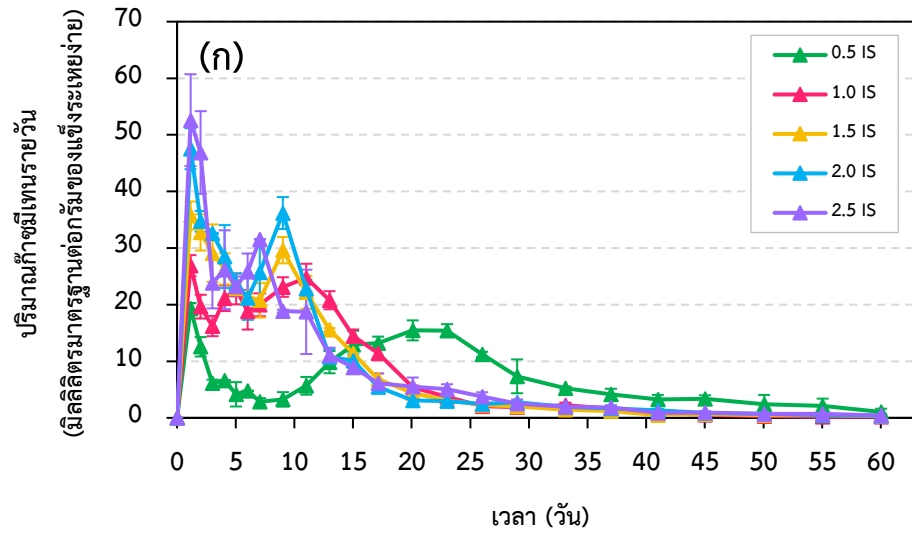
หัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (ฟางข้าวและมูลโคนม) อัตราส่วน 0.25:1 และ 0.3:1 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นตั้งแต่วันแรกของการย่อยสลาย และไม่เกิดการผลิตก๊าซมีเทนเลยในช่วงวันที่ 5 – 10 ของการย่อยสลาย ส่วนอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนที่สูงกว่า ซึ่งได้แก่ อัตราส่วน 0.5:1 1:1 และ 1.5:1 มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นตั้งแต่วันแรกของการย่อยสลาย และไม่พบความล้มเหลวเกิดขึ้นในระบบ แต่การเกิดก๊าซมีเทนลดลงทันทีหลังจากมีการเกิดขึ้นในปริมาณสูงสุดและลดลงอย่างต่อเนื่องไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย สำหรับการศึกษานี้ อัตราส่วน I/S 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีแนวโน้มการเกิดก๊าซมีเทนลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากวันที่ 11 ของการย่อยสลาย และมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 30 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ในขณะที่อัตราส่วน 0.5:1 มีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งในช่วงวันที่ 9 – 23 ของการย่อยสลาย หลังจากนั้นการเกิดก๊าซมีเทนก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ในวันที่ 50 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย



ภาพที่ 4.17

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันของการหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน

(ก) เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ 4.19

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานีกล่าภาวะมาตรฐาน แบบเดิมไม่ใช้เตาอบเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริตรมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	0.00	19.29 ± 1.00	12.56 ± 1.71	6.12 ± 0.63	6.62 ± 0.00	4.16 ± 2.15	4.77 ± 0.00	2.86 ± 0.62	3.27 ± 1.27	5.67 ± 1.56	9.84 ± 1.96	12.91 ± 2.49			
I/S 1:1	0.00	26.88 ± 1.87	19.65 ± 2.10	16.22 ± 1.79	21.13 ± 2.26	22.79 ± 2.73	18.81 ± 3.21	19.97 ± 2.03	23.11 ± 1.73	24.77 ± 2.46	20.78 ± 1.60	14.44 ± 1.17			
I/S 1.5:1	0.00	35.75 ± 2.48	32.77 ± 3.20	29.11 ± 5.08	26.32 ± 2.75	22.88 ± 1.03	21.40 ± 0.51	20.76 ± 3.04	29.63 ± 2.33	22.18 ± 2.90	15.57 ± 0.30	11.42 ± 0.88			
I/S 2:1	0.00	47.56 ± 3.63	34.73 ± 1.82	32.59 ± 0.11	28.50 ± 5.56	23.75 ± 1.76	21.17 ± 3.86	25.72 ± 4.93	36.18 ± 2.83	22.84 ± 1.55	10.75 ± 1.35	10.07 ± 1.14			
I/S 2.5:1	0.00	52.60 ± 8.11	46.87 ± 7.31	23.84 ± 4.49	26.17 ± 6.97	23.21 ± 1.76	25.82 ± 3.21	31.54 ± 0.00	18.85 ± 0.26	18.72 ± 7.45	11.07 ± 1.35	8.89 ± 0.67			
อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริตรมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
I/S 0.5:1	13.18 ± 1.17	15.46 ± 1.77	15.42 ± 1.14	11.20 ± 0.47	7.34 ± 2.99	5.24 ± 0.31	4.17 ± 0.97	3.27 ± 0.79	3.36 ± 0.63	2.41 ± 1.64	2.14 ± 1.26	1.03 ± 0.59			
I/S 1:1	11.40 ± 0.99	5.42 ± 0.31	3.71 ± 0.78	2.09 ± 0.46	1.90 ± 0.30	2.25 ± 0.43	1.63 ± 0.35	0.87 ± 0.52	0.55 ± 0.40	0.33 ± 0.02	0.18 ± 0.11	0.21 ± 0.04			
I/S 1.5:1	6.82 ± 1.04	4.37 ± 1.13	3.08 ± 0.62	2.28 ± 0.17	2.00 ± 0.63	1.44 ± 0.13	1.24 ± 0.13	0.49 ± 0.13	0.67 ± 0.00	0.46 ± 0.20	0.46 ± 0.25	0.33 ± 0.00			
I/S 2:1	5.47 ± 1.15	3.11 ± 0.50	2.99 ± 0.35	2.46 ± 0.69	2.74 ± 0.18	1.93 ± 0.37	1.68 ± 0.53	1.31 ± 0.22	0.87 ± 0.23	0.73 ± 0.22	0.50 ± 0.16	0.38 ± 0.28			
I/S 2.5:1	6.12 ± 1.72	5.52 ± 1.60	5.04 ± 0.89	3.77 ± 0.75	2.50 ± 0.76	1.98 ± 0.45	1.82 ± 0.35	0.86 ± 0.26	0.93 ± 0.26	0.73 ± 0.00	0.72 ± 0.00	0.44 ± 0.10			

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.20

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานีกลางท่าอากาศยานนานาชาติเชียงใหม่เดิมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรัมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	0.00	12.87 ± 3.79	4.83 ± 0.00	4.47 ± 3.03	7.06 ± 0.63	6.08 ± 4.55	2.15 ± 0.76	1.07 ± 0.00	0.18 ± 0.00	0.18 ± 0.00	0.13 ± 0.06	0.09 ± 0.00			
I/S 1:1	0.00	24.49 ± 0.00	10.64 ± 0.63	5.27 ± 0.63	3.04 ± 0.00	1.52 ± 0.38	0.98 ± 0.13	0.36 ± 0.00	0.17 ± 0.00	0.14 ± 0.06	0.13 ± 0.06	0.09 ± 0.00			
I/S 1.5:1	0.00	36.77 ± 3.32	10.19 ± 1.55	5.72 ± 0.89	2.62 ± 0.37	1.31 ± 0.21	1.41 ± 0.18	0.52 ± 0.31	0.16 ± 0.00	0.13 ± 0.05	0.16 ± 0.00	0.13 ± 0.05			
I/S 2:1	0.00	35.48 ± 1.84	20.92 ± 1.00	8.72 ± 1.89	6.08 ± 0.00	3.09 ± 1.32	3.87 ± 0.00	3.11 ± 1.70	2.48 ± 1.46	2.39 ± 1.39	4.00 ± 3.59	4.87 ± 4.82			
I/S 2.5:1	0.00	64.66 ± 2.58	25.09 ± 1.03	22.41 ± 1.03	16.75 ± 1.03	11.98 ± 1.79	15.66 ± 1.03	14.47 ± 0.52	20.92 ± 7.17	26.15 ± 0.79	23.54 ± 2.29	12.85 ± 2.09			
อัตราส่วน	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรัมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
I/S 0.5:1	0.05 ± 0.04	0.06 ± 0.00	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00			
I/S 1:1	0.05 ± 0.06	0.03 ± 0.04	0.00 ± 0.00	0.02 ± 0.03	0.15 ± 0.21	0.99 ± 1.03	5.67 ± 0.86	5.56 ± 1.64	1.97 ± 0.32	2.76 ± 0.88	6.64 ± 2.30	6.08 ± 3.31			
I/S 1.5:1	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.03 ± 0.06	0.58 ± 0.80	4.32 ± 3.16	6.46 ± 1.13	4.37 ± 1.12	4.16 ± 2.66	5.45 ± 1.14	6.80 ± 2.01			
I/S 2:1	8.79 ± 8.09	11.33 ± 1.09	11.43 ± 3.95	9.94 ± 1.55	9.92 ± 4.15	12.27 ± 1.59	9.82 ± 3.64	8.89 ± 2.41	5.25 ± 0.80	3.81 ± 0.00	1.72 ± 0.25	1.42 ± 0.38			
I/S 2.5:1	6.22 ± 1.43	7.58 ± 1.29	5.21 ± 0.22	4.39 ± 0.60	3.44 ± 0.88	2.89 ± 0.64	2.33 ± 1.02	2.00 ± 0.79	1.44 ± 0.34	1.00 ± 0.34	0.69 ± 0.10	0.00 ± 0.00			

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.3.3 ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม (Cumulative methane yields) ที่เกิดขึ้นจากการหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 ที่สภาวะมาตรฐาน ตลอดระยะเวลา 60 วัน มีลักษณะและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนแสดงดังภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.21 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.18 (ก) และตารางที่ 4.21 เมื่อพิจารณาลักษณะการเติบโตของเส้นกราฟผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของทั้ง 5 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 จะเห็นว่า อัตราส่วน I/S 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 ซึ่งมีปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าหรือเท่ากับวัสดุตั้งต้น จะมีการผลิตก๊าซมีเทนได้ทันที ในขณะที่อัตราส่วน I/S 0.5:1 ซึ่งมีปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์น้อยกว่าวัสดุตั้งต้น ต้องการระยะเวลาในการปรับตัวระยะหนึ่งก่อนมีการผลิตก๊าซมีเทนขึ้น

นอกจากนี้ก็ไม่พบว่ามีกการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนที่รุนแรงเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลายของทั้ง 5 อัตราส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอัตราส่วน อัตราส่วน I/S 0.5:1 ซึ่งมีปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์น้อยกว่าวัสดุตั้งต้น ที่อาจส่งผลให้ระบบมีอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนได้ค่อนข้างต่ำและไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้กลายเป็นก๊าซมีเทน และส่งผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและแอมโมเนียในปริมาณมากจนส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบหรือเกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนได้ในที่สุด ทั้งนี้การไม่เกิดการยับยั้งจากผลกระทบดังที่กล่าวมาในระบบการย่อยสลายของอัตราส่วน I/S 0.5:1 ก็เป็นเพราะการมีอยู่ของโซเดียมไบคาร์เนตที่ช่วยรักษาความเป็นต่างของระดับพีเอชของระบบให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย จึงสามารถป้องกันความล้มเหลวในการผลิตก๊าซมีเทนไม่ให้เกิดขึ้นได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นโดยไม่มีการใช้พีเอชบัฟเฟอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.18 (ข) และตารางที่ 4.22 พบว่า อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 และ 1.5:1 มีการยับยั้งการสร้างมีเทนอย่างรุนแรงในช่วงวันที่ 5 – 33 ในขณะที่อัตราส่วน 2:1 มีการยับยั้งการสร้างมีเทนรุนแรงเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ในช่วงวันที่ 5 – 11 ส่วนอัตราส่วน 2.5:1 ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยในช่วงวันที่ 2 – 5 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มสูงขึ้นสามารถช่วยให้ระบบมีความสมดุลและมีความเสถียรในการดำเนินการย่อยสลายได้ต่อไปอย่างต่อเนื่องในอัตราการผลิตที่ลดลง

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน พบว่า I/S 2:1 และ 2.5:1 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมใกล้เคียงกัน เท่ากับ 451.23 ± 13.29 และ 442.12 ± 19.98 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และให้ผลผลิตสูงกว่าอัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 และ 1.5:1 คิดเป็น 1.2 1.1 และ 1.1 เท่า ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ

Akyol (2020) ที่พบว่า การย่อยสลายของอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (กากกาแฟและมูลวัว) อัตราส่วน I/S 3.5:1 ให้ผลผลิตสูงกว่าอัตราส่วน I/S 0.5:1 0.75:1 1:1 1.25:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 คิดเป็น 1.1 – 2.3 เท่า และให้ผลผลิตสูงกว่าอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่สูงกว่า (อัตราส่วน 4:1) คิดเป็น 1.5 เท่า และสำหรับการศึกษาอัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมถึงระดับร้อยละ 80 ภายในระยะเวลา 33 17 15 11 และ 15 ตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มสูงขึ้น สามารถช่วยให้ระบบมีความเสถียรและผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่น้อยลง

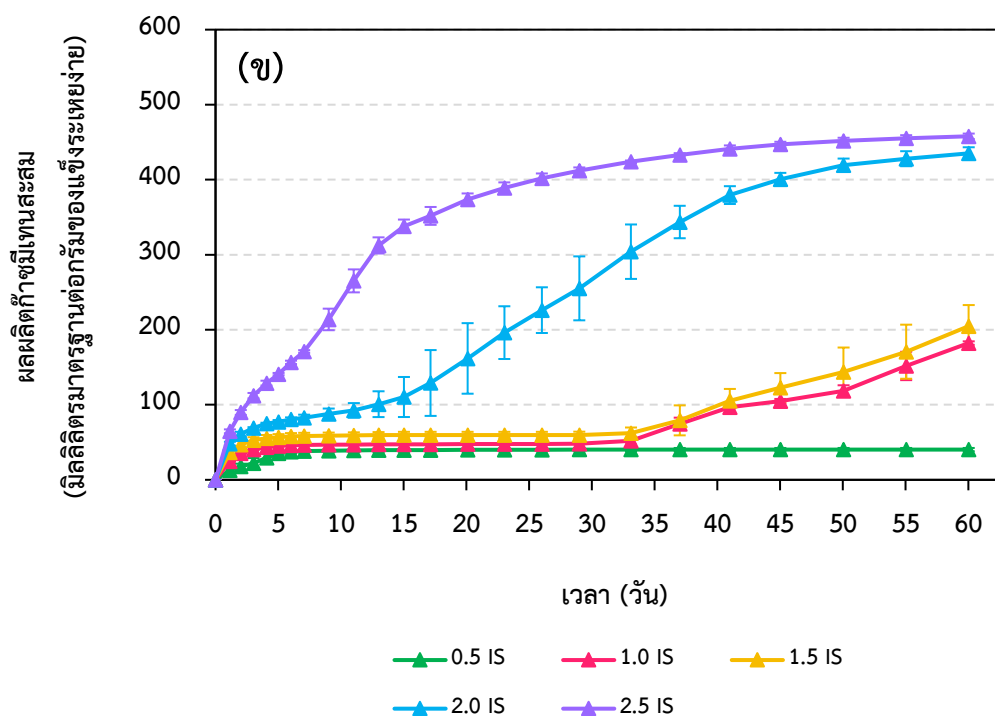
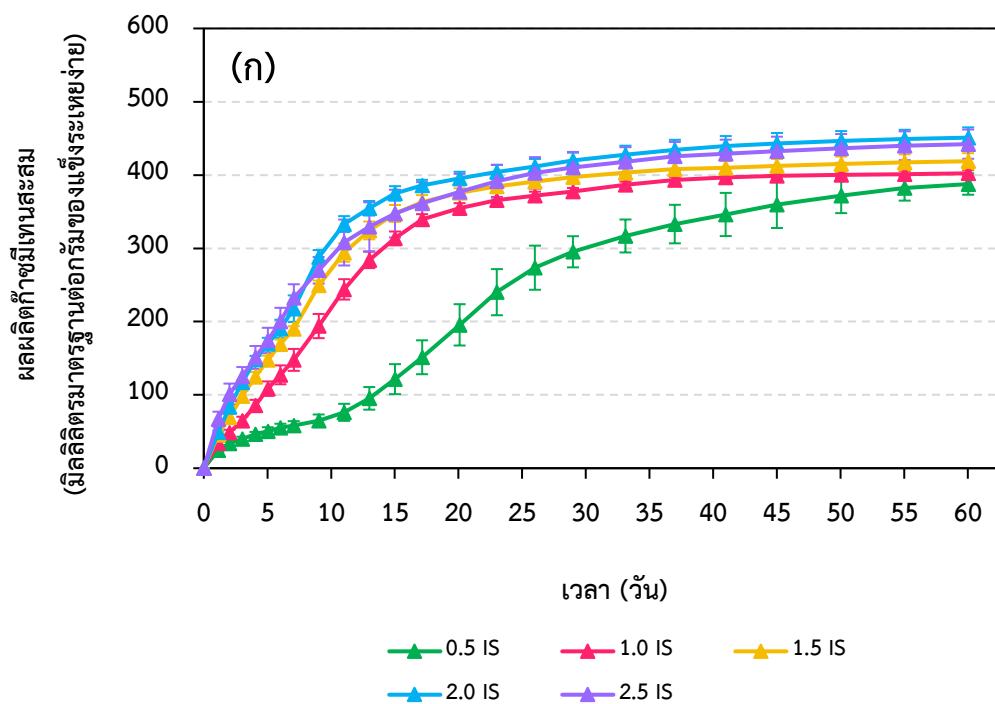
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นโดยไม่มีการใช้พีเอชบัฟเฟอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.18 (ข) และตารางที่ 4.22 ก็ชี้ให้เห็นว่า อัตราส่วน 2:1 และ 2.5:1 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนได้เร็วมากที่สุด และให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดและมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน นั่นคือ เท่ากับ 435.14 ± 8.09 และ 457.88 ± 3.58 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย และให้ผลผลิตสูงกว่าอัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 และ 1.5:1 คิดเป็น 11.4 2.5 และ 2.2 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายของอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นโดยไม่มีการควบคุมระบบด้วยพีเอชบัฟเฟอร์ ควรใช้อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น เพื่อให้ระบบมีความเสถียรและช่วยให้ระบบเกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนภายในระบบน้อยมากที่สุด

เมื่อพิจารณาข้อมูลของผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกันต่อผลผลิตก๊าซมีเทนทั้งที่มีการควบคุมและไม่ควบคุมระบบ (เต็ม/ไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต) ซึ่งได้แก่ อัตราเร็วในการย่อยสลาย และผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม รวมถึงระยะเวลาในกาปรับตัว (λ) และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (μ_m) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์ จึงสรุปได้ว่า การหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น อัตราส่วน 2:1 และ 2.5:1 มีความเสถียรและผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ภาพที่ 4.18

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของการหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน

(ก) เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต และ (ข) ไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ 4.21

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่โรงบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศแบบไร้ออกซิเจน (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริตรวมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	0.00	24.45 ± 1.26	33.71 ± 2.53	39.84 ± 3.16	46.42 ± 3.16	50.58 ± 5.31	55.37 ± 5.31	58.28 ± 5.94	54.82 ± 8.47	76.27 ± 11.63	75.32 ± 15.42	121.52 ± 20.48			
I/S 1:1	0.00	34.11 ± 2.37	48.56 ± 3.90	54.79 ± 5.44	35.79 ± 7.44	108.58 ± 9.85	127.45 ± 12.90	147.80 ± 14.97	193.95 ± 16.52	244.02 ± 13.87	284.26 ± 11.21	313.58 ± 9.41			
I/S 1.5:1	0.00	15.40 ± 3.14	59.47 ± 5.46	38.61 ± 7.17	124.77 ± 6.59	147.64 ± 5.95	169.11 ± 6.47	190.28 ± 3.38	249.45 ± 6.71	294.29 ± 12.56	324.43 ± 12.15	347.62 ± 11.55			
I/S 2:1	0.00	19.03 ± 2.37	33.67 ± 3.22	117.13 ± 2.87	148.19 ± 5.08	169.72 ± 8.19	190.42 ± 12.17	217.67 ± 18.09	288.06 ± 9.60	333.14 ± 10.76	354.71 ± 9.92	374.98 ± 9.83			
I/S 2.5:1	0.00	56.89 ± 10.28	101.24 ± 14.26	125.10 ± 12.91	151.11 ± 15.63	174.31 ± 17.29	200.22 ± 18.62	232.38 ± 18.62	270.07 ± 18.13	307.93 ± 31.32	329.33 ± 32.54	347.38 ± 32.54			
อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริตรวมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
I/S 0.5:1	151.39 ± 23.13	195.61 ± 28.19	240.19 ± 31.48	273.59 ± 30.09	295.29 ± 21.54	316.87 ± 22.50	333.10 ± 26.29	346.20 ± 29.46	359.74 ± 31.98	371.81 ± 23.77	382.55 ± 17.45	387.66 ± 14.54			
I/S 1:1	339.45 ± 7.16	354.92 ± 6.71	365.62 ± 4.47	371.84 ± 5.44	377.46 ± 4.92	386.74 ± 4.26	393.10 ± 4.47	396.56 ± 3.40	398.77 ± 4.37	400.40 ± 4.27	401.33 ± 4.13	402.38 ± 4.28			
I/S 1.5:1	363.13 ± 9.49	375.60 ± 6.29	384.50 ± 7.21	391.29 ± 7.63	397.19 ± 9.46	403.13 ± 9.54	407.95 ± 9.15	409.93 ± 9.33	412.62 ± 9.33	414.90 ± 10.34	417.20 ± 11.04	418.84 ± 11.04			
I/S 2:1	385.80 ± 7.69	395.27 ± 9.18	404.17 ± 9.50	411.53 ± 10.43	419.80 ± 10.71	427.68 ± 12.35	434.21 ± 13.86	439.47 ± 13.69	442.94 ± 14.40	446.60 ± 13.37	449.10 ± 12.67	451.23 ± 13.29			
I/S 2.5:1	361.34 ± 28.98	377.07 ± 24.59	391.62 ± 22.53	402.85 ± 21.57	410.21 ± 21.32	418.36 ± 19.63	425.47 ± 19.65	428.93 ± 19.29	432.67 ± 19.65	436.30 ± 19.65	439.95 ± 19.65	442.12 ± 19.98			

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.22

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ลดภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอนेट (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	0.00	12.87 ± 3.79	17.70 ± 3.79	22.17 ± 6.83	29.23 ± 7.46	35.31 ± 2.91	37.45 ± 2.15	38.53 ± 2.15	38.89 ± 2.15	39.24 ± 2.15	39.51 ± 2.28	39.69 ± 2.28			
I/S 1:1	0.00	24.49 ± 0.00	35.13 ± 0.63	40.40 ± 0.00	43.44 ± 0.00	44.96 ± 0.38	45.95 ± 0.25	46.30 ± 0.25	46.66 ± 0.25	46.92 ± 0.13	47.19 ± 0.00	47.36 ± 0.00			
I/S 1.5:1	0.00	36.77 ± 3.32	46.96 ± 4.86	52.68 ± 4.08	55.30 ± 4.44	56.61 ± 4.23	58.03 ± 4.24	58.55 ± 4.10	58.87 ± 4.10	59.13 ± 4.16	59.45 ± 4.16	59.71 ± 4.23			
I/S 2:1	0.00	48.18 ± 2.53	60.79 ± 3.16	68.92 ± 1.26	74.83 ± 1.26	77.15 ± 2.53	80.67 ± 2.53	82.76 ± 4.05	87.94 ± 7.08	92.50 ± 9.73	100.81 ± 17.19	110.38 ± 26.67			
I/S 2.5:1	0.00	64.66 ± 2.58	89.75 ± 3.22	112.16 ± 3.61	128.90 ± 3.22	140.88 ± 1.55	156.54 ± 2.25	171.01 ± 1.79	213.74 ± 14.36	265.15 ± 15.31	312.41 ± 10.77	338.06 ± 8.80			
อัตราส่วน	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
I/S 0.5:1	วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
I/S 0.5:1	39.81 ± 2.36	39.98 ± 2.36	40.09 ± 2.26	40.21 ± 2.17	40.26 ± 2.17	40.26 ± 2.17	40.26 ± 2.17	40.26 ± 2.17	40.26 ± 2.17	40.26 ± 2.17	40.26 ± 2.17	40.26 ± 2.17			
I/S 1:1	47.48 ± 0.13	47.56 ± 0.02	47.56 ± 0.02	47.63 ± 0.08	48.06 ± 0.69	52.08 ± 4.87	74.55 ± 8.28	96.91 ± 1.70	104.78 ± 2.97	118.61 ± 7.39	151.77 ± 18.90	182.24 ± 2.34			
I/S 1.5:1	59.71 ± 4.23	59.71 ± 4.23	59.71 ± 4.23	59.71 ± 4.23	59.80 ± 4.38	62.12 ± 7.61	79.24 ± 19.98	105.21 ± 15.91	122.69 ± 19.55	143.52 ± 32.79	170.75 ± 36.04	204.83 ± 28.08			
I/S 2:1	129.07 ± 43.87	161.79 ± 47.03	196.16 ± 35.14	226.15 ± 30.47	255.19 ± 42.60	304.05 ± 36.28	343.60 ± 21.62	379.48 ± 11.88	400.36 ± 8.72	419.43 ± 8.72	427.98 ± 9.99	435.14 ± 8.09			
I/S 2.5:1	351.76 ± 11.90	373.49 ± 8.19	388.87 ± 7.55	402.05 ± 6.26	412.14 ± 4.22	423.82 ± 1.79	433.10 ± 2.28	441.17 ± 4.50	446.91 ± 3.65	451.87 ± 4.03	455.32 ± 4.03	457.88 ± 3.58			

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.3.4 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลอง (Experimental) ของอัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 กับผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทำนาย (Predicted) โดยใช้ Modified Gompertz model แสดงได้ดังภาพที่ 4.19 และ 4.20 ส่วนพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์โมเดลต่าง ๆ ตลอดจนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.23

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.23 และภาพที่ 4.19 และ 4.20 จะเห็นว่า ผลการทำนายของ Modified Gompertz model ในอัตราส่วนทุกอัตราส่วนให้ค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 (0.9790 – 0.9986) และมีค่า %Error น้อยกว่าร้อยละ 10 แสดงให้เห็นว่า Modified Gompertz model ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของการศึกษาอิทธิพลของหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในทุกอัตราส่วนได้แม่นยำเป็นอย่างดี และเมื่อพิจารณาค่า λ และ μ_m ของทุกอัตราส่วน พบว่า อัตราส่วน I/S 0.5:1 และ 1:1 มีค่า λ เท่ากับ 3.12 และ 0.64 วัน ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วน I/S 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 มีค่า λ เท่ากับ 0.00 วัน ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่น้อยลงต้องใช้ระยะเวลาปรับตัวในระบบนานขึ้น สอดคล้องกับลักษณะการเติบโตของเส้นกราฟผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม (ภาพที่ 4.18 (ก)) ส่วนค่า μ_m ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วน I/S 2:1 และ 2.5:1 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดใกล้เคียงกัน เท่ากับ 32.42 และ 31.44 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย และมีอัตราการผลิตที่สูงกว่าอัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 และ 1.5:1 คิดเป็น 2.8 1.3 และ 1.1 เท่าตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่เพิ่มสูงขึ้นจะเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วกว่าอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นที่น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ จากค่าของ μ_m ที่สูงกว่านั่นเอง

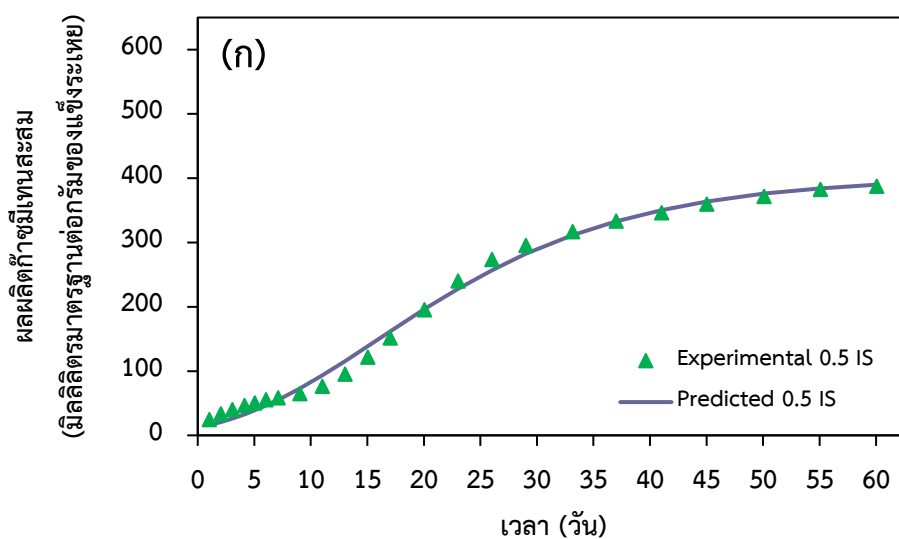
ตารางที่ 4.23

พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้โมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

I/S ratios	Y_0		μ_m (NmL gVS ⁻¹ day ⁻¹)	λ (days)	R ²	%Error	RMSE (NmL/gVS)
	Experimental (NmL/gVS)	Predicted (NmL/gVS)					
0.5:1	387.66	402.14	11.65	3.12	0.9935	3.74	10.82
1:1	402.38	396.88	24.06	0.64	0.9986	-1.37	5.01
1.5:1	418.84	408.74	28.24	0.00	0.9976	-2.41	6.26
2:1	451.23	433.46	32.42	0.00	0.9923	-3.94	11.52
2.5:1	442.12	420.22	31.44	0.00	0.9790	-4.95	17.57

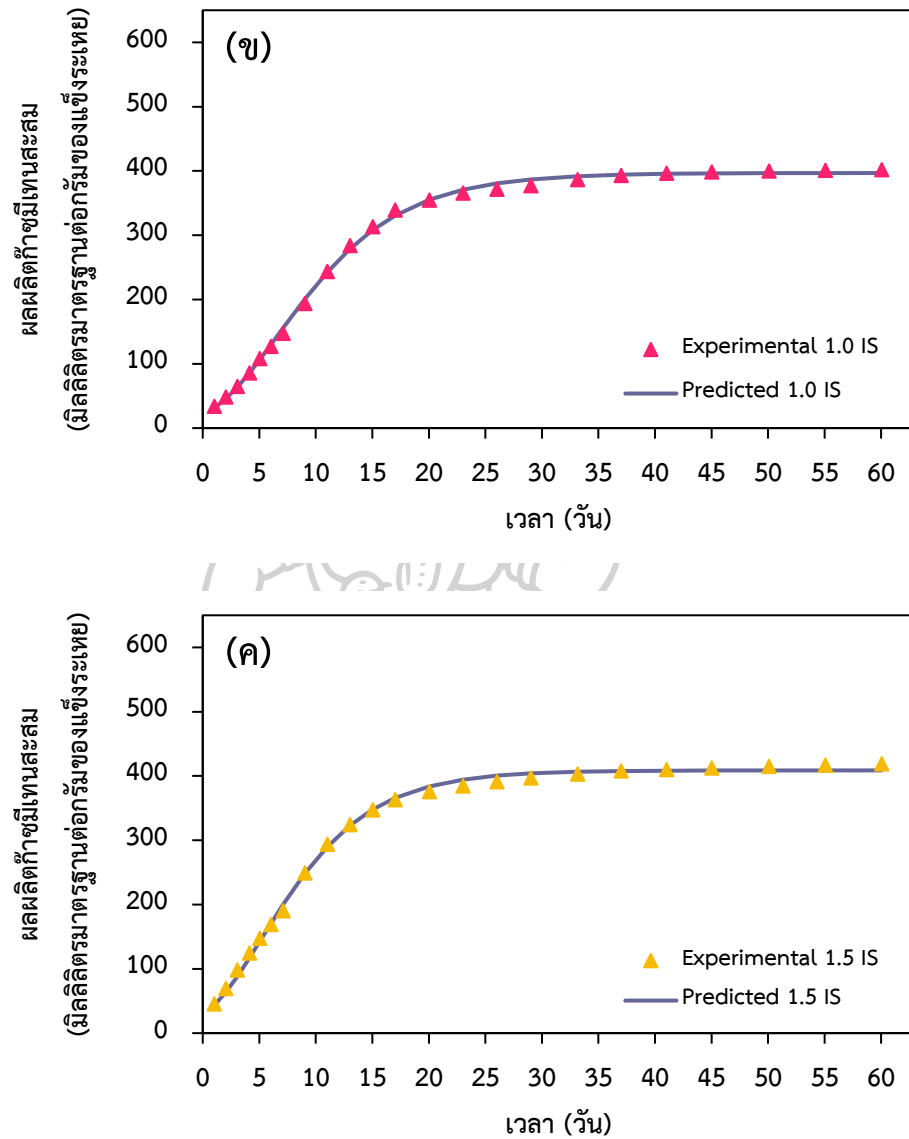
ภาพที่ 4.19

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)



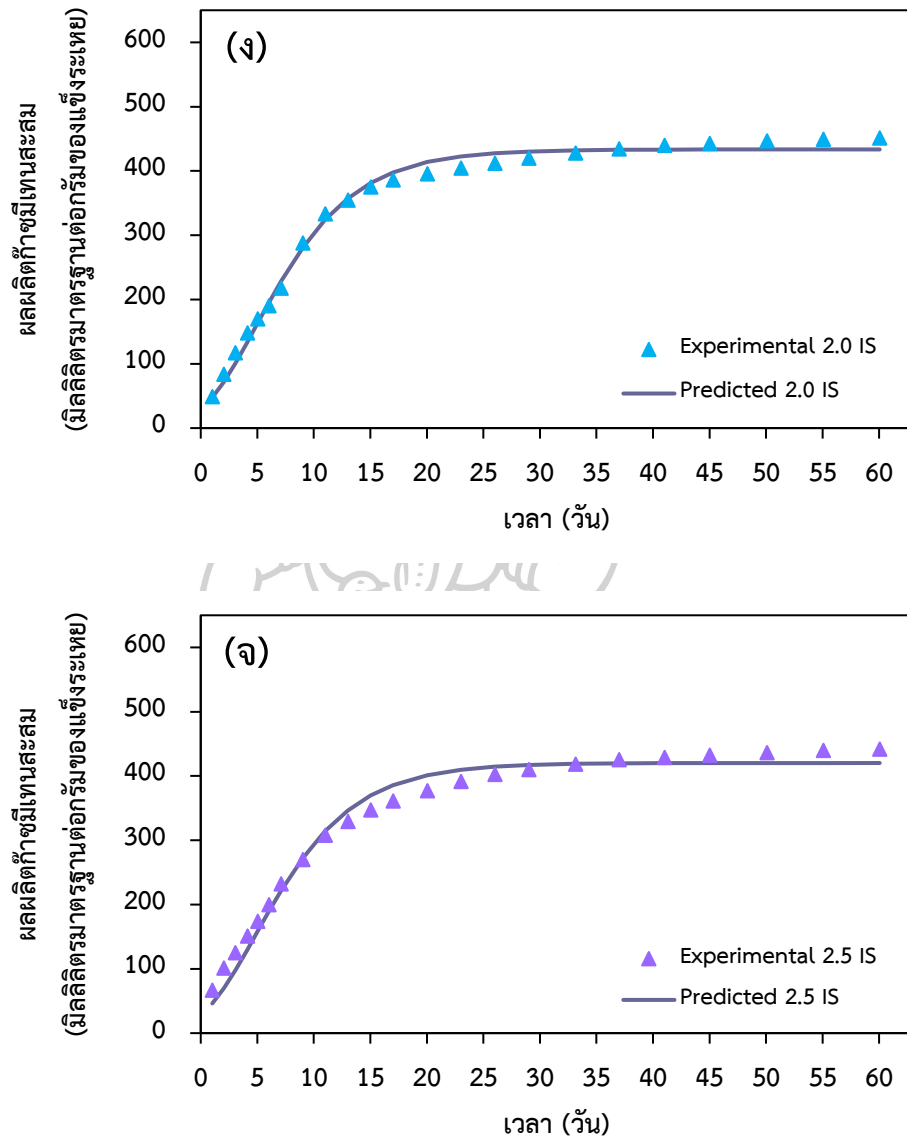
ภาพที่ 4.19

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเต็ม โขเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)



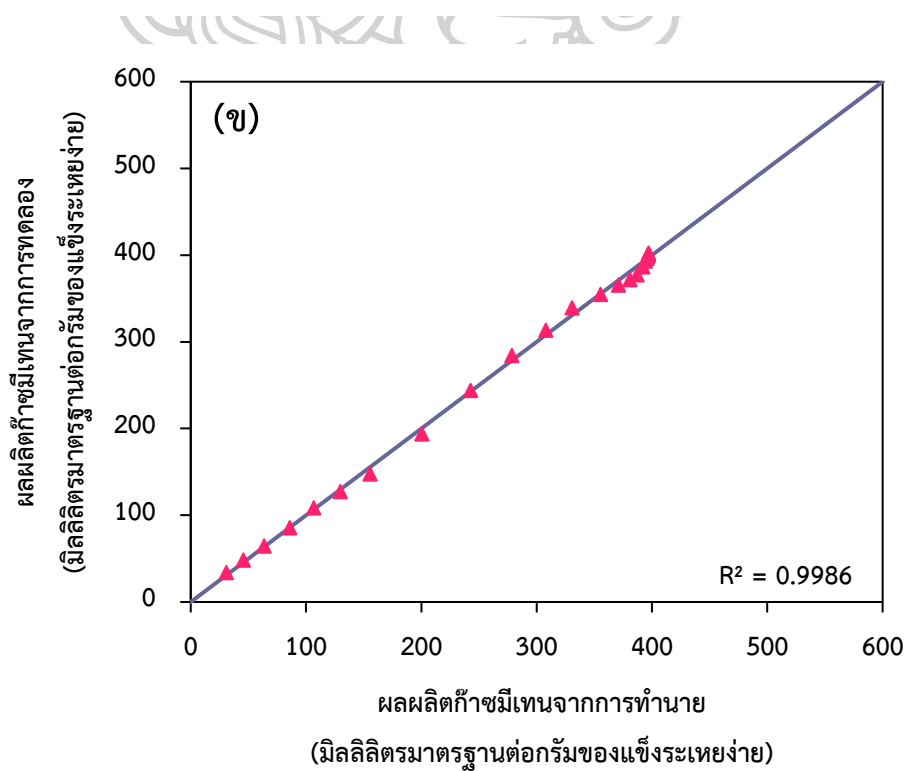
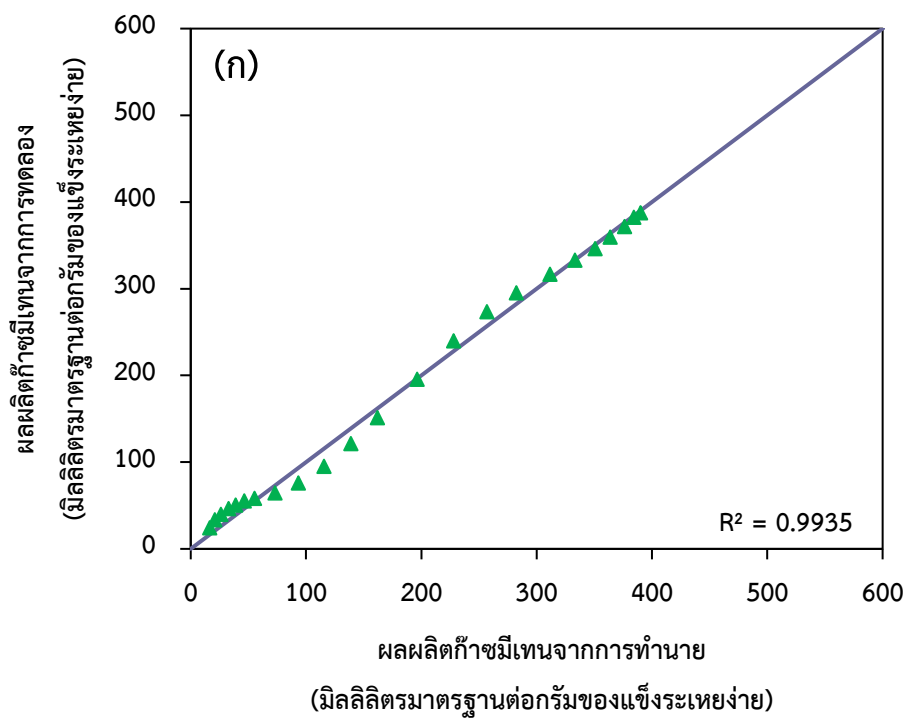
ภาพที่ 4.19

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษา แบบเต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)



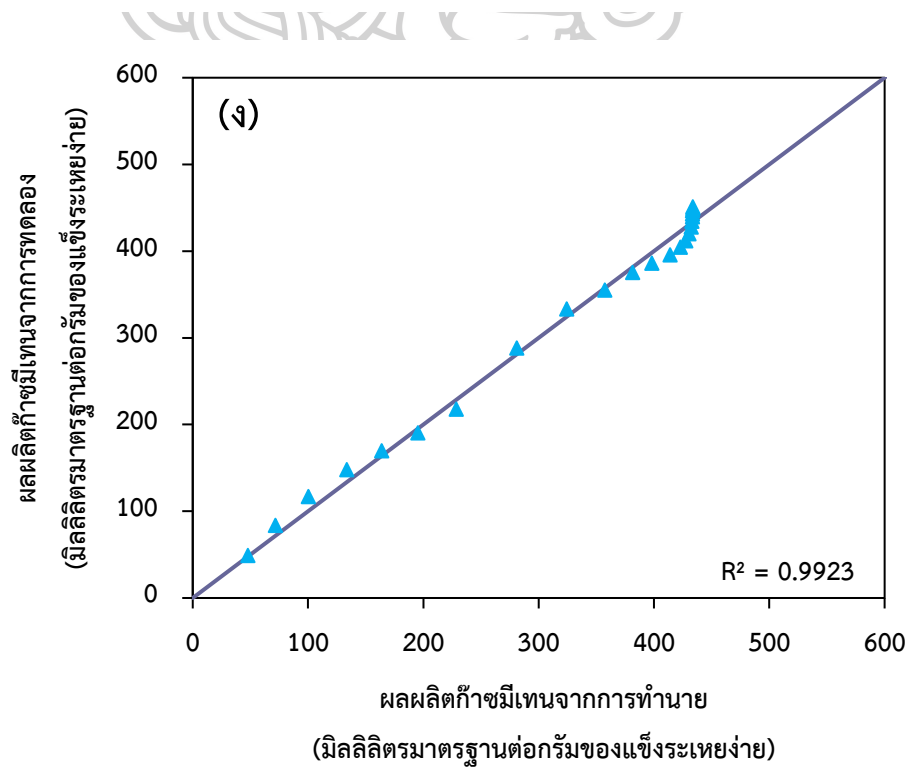
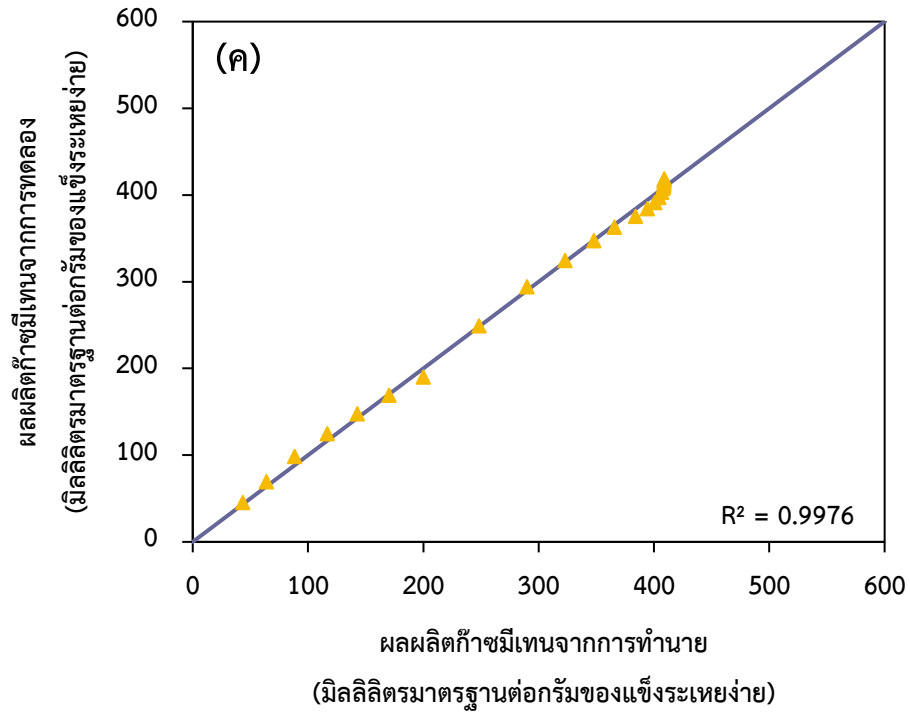
ภาพที่ 4.20

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษาแบบเต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)



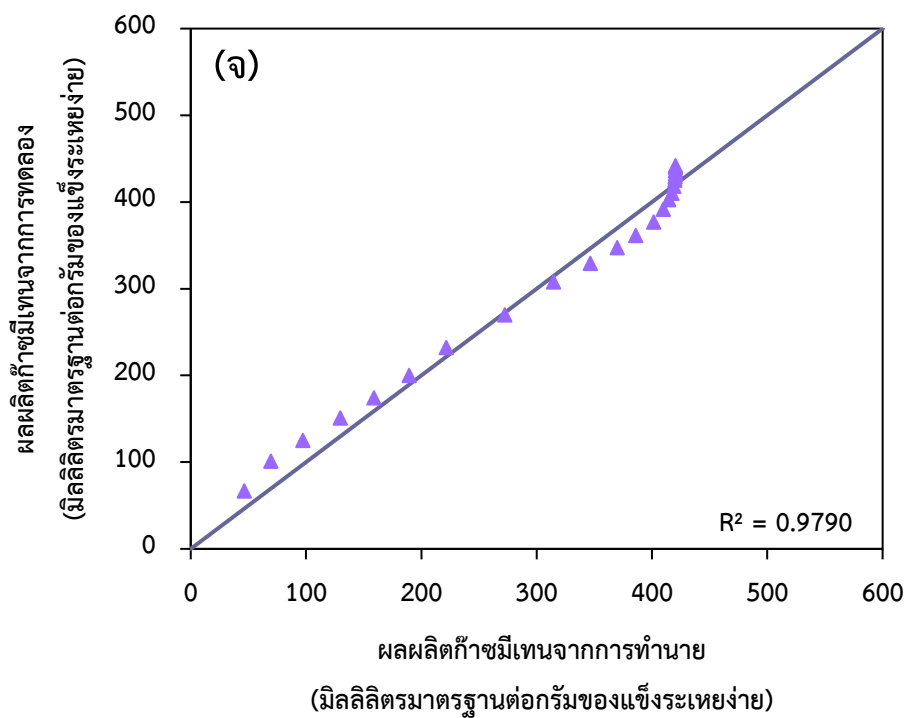
ภาพที่ 4.20

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษาแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)



ภาพที่ 4.20

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนของโมเดลที่ศึกษาแบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร (Food waste, FW) และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (Cellulose-based food packaging product, CFPP) (วัสดุตั้งต้น) ที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส ในรูปแบบแบตช์ ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน ซึ่งมีผลการศึกษาในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์ การผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 ลักษณะของวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์

เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง โดยมีปริมาณสูงมากกว่าร้อยละ 90 รวมถึงมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูงมากกว่าร้อยละ 50 แสดงให้เห็นว่า วัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด อุดมไปด้วยสารอินทรีย์และมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ แต่เนื่องด้วยวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นค่อนข้างสูง/ต่ำเกินไป ส่งผลให้เศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสัดส่วนที่สูง/ต่ำมากจนเกินไปเช่นกัน (C/N ratio = 12 และ 460 ตามลำดับ) อีกทั้งวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุตั้งต้นสูงถึงร้อยละ 80 ส่งผลให้วัสดุตั้งต้นเกิดการย่อยสลายได้ง่ายและยากแตกต่างกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่า หากนำเศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อาจทำให้ระบบขาดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ เนื่องระบบอาจขาดแคลนคาร์บอนหรือไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มอาร์เคียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทน รวมถึงอาจเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดที่สามารถส่งผลให้สภาวะในระบบไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีหน้าที่สำคัญในกระบวนการย่อยสลายได้ นอกจากนี้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในกระบวนการย่อยสลายก็มีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกลาง ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบ รวมถึงยังช่วยส่งเสริมให้การเริ่มต้นเดินระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมดุลมากยิ่งขึ้น จึงเป็นไปได้ว่า หากนำวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด มาทำการหมักร่วมกัน อาจช่วยให้เกิดการปรับปรุงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุตั้งต้น และส่งผลให้ระบบมีการผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.1.2 การผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพ บรรจุอาหาร

การตรวจสอบศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส ในรูปแบบแบตช์ ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน ประกอบด้วย การทดลอง 2 ชุด ซึ่งได้แก่ การทดลองชุดที่ 1: ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร (FW/CFPP) อัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) และมีการใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 2 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) และการทดลองชุดที่ 2: อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (I/S) ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1 ต่อผลผลิตก๊าซมีเทน อัตราส่วน 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย) ทั้งนี้การทดลองทั้ง 2 ชุดการทดลอง มีผลการตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายในขวดหมัก ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมภายในระบบ และผลการทำนายของจลนพลศาสตร์ ดังต่อไปนี้

1) ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio) เท่ากับ 12 14 18 25 45 และ 460 ตามลำดับ ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน โดยมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อควบคุมระบบให้มีความสมดุล พบว่า ทุกอัตราส่วนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายในเฟสของเหลว ได้แก่ พีเอช (pH) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs) ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk) อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง (Volatile fatty acids to alkalinity ratio, VFAs/Alk ratio) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen, TAN) และซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand, SCOD) ที่แตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพและเคมีเริ่มต้นของวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนนั้น ๆ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ดังกล่าว ก็ส่งผลให้ระบบของแต่ละอัตราส่วนได้รับผลกระทบในระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันเช่นเดียวกัน โดยระดับความรุนแรงที่ระบบของแต่ละอัตราส่วนได้รับก็แสดงออกให้เห็นในลักษณะของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น/ลดลงในแต่ละวันของการย่อยสลาย รวมถึงผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย อัตราส่วน FW/CFPP 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ให้

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม เท่ากับ 505.87 474.88 451.23 420.35 392.35 และ 393.28 มิลลิลิตร มาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมระบบให้มีความสมดุล พบว่า อัตราส่วน FW/CFPP 60:40 และ 40:60 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมใกล้เคียงกันและมี ปริมาณสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน FW/CFPP 20:80 0:100 80:20 และ 100:0 โดยมีผลผลิต ก๊าซมีเทน เท่ากับ 439.63 423.24 368.05 307.04 157.14 และ 99.48 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อ กรมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและ ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมระบบให้มีความสมดุล รวมถึงการใช้วัสดุตั้งต้นซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงหรืออยู่ในช่วงที่ เหมาะสม (C/N ratio = 20 – 30) (Kothari et al., 2014; Li et al., 2011) สามารถช่วยส่งเสริมให้ กระบวนการย่อยสลายมีความเสถียรและมีการผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และ เมื่อพิจารณาข้อมูลของผลการศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อัตราเร็วในการย่อย สลาย และผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม รวมถึงระยะเวลาในการปรับตัว (λ) และอัตราการผลิตก๊าซมีเทน สูงสุด (μ_m) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์ จึงสรุปได้ว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหาร และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร อัตราส่วน 60:40 มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับนำไปใช้ใน การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในลำดับถัดไป

2) อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นต่อผลผลิตก๊าซมีเทน การย่อยสลายของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น (FW/CFPP 60:40) อัตราส่วน 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 60 วัน โดยมี การเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมระบบให้มีความสมดุล พบว่า ทุกอัตราส่วนมีลักษณะการ เปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายในเฟสของเหลว ได้แก่ พีเอช กรดไขมัน ระเหยง่าย ความเป็นต่าง อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นต่าง แอมโมเนียไนโตรเจน ทั้งหมด และซีโอดีละลาย ที่แตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพและเคมีเริ่มต้นของวัสดุตั้งต้นและ ปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนนั้น ๆ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ ระหว่างพารามิเตอร์ดังกล่าว ก็ส่งผลให้ระบบของแต่ละอัตราส่วนได้รับผลกระทบในระดับความ รุนแรงที่แตกต่างกันเช่นเดียวกัน โดยระดับความรุนแรงที่ระบบของแต่ละอัตราส่วนได้รับก็แสดงออก ให้เห็นในลักษณะของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น/ลดลงในแต่ละวันของการย่อยสลาย รวมถึง ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลาย อัตราส่วน I/S 0.5:1 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม เท่ากับ 387.66 402.38 418.84 451.23 และ 442.12 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรหมักร่วมของอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น แบบไม่เติม

โซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมระบบให้มีความสมดุล พบว่า อัตราส่วน 2.5:1 และ 2:1 ให้ผลผลิต ก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดและมีปริมาณใกล้เคียงกัน รองลงมาคืออัตราส่วน I/S 1.5:1 1:1 และ 0.5:1 โดยมีค่าผลผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 457.88 435.14 204.83 182.24 และ 40.26 มิลลิลิตร มาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การย่อยสลายโดยมี อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น รวมถึงมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อควบคุมระบบให้มีความสมดุล สามารถช่วยส่งเสริมให้กระบวนการย่อยสลายมีความเสถียรและมีการผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาข้อมูลของผลการศึกษา ซึ่ง ได้แก่ อัตราเร็วในการย่อยสลาย และผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม รวมถึงระยะเวลาในการปรับตัว (λ) และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (μ_m) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์ จึงสรุปได้ว่า การหมักร่วมระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้น อัตราส่วน 2:1 และ 2.5:1 มีความเสถียรและผลิตก๊าซ มีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

3) จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทน

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลอง (Experimental) กับผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทำนาย (Predicted) โดยใช้ Modified Gompertz model ตลอดจนสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ร้อยละความแตกต่างระหว่างผลผลิตก๊าซ มีเทนจากการทำนายและผลผลิตก๊าซมีเทนจากการทดลอง (%Error) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความ คลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ซึ่งให้เห็นว่า Modified Gompertz model เป็นโมเดลที่แม่นยำและ เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนในทั้ง 2 ชุดการทดลอง เนื่องจากผลการทำนายของ Modified Gompertz model ในทุกอัตราส่วนของทั้ง 2 ชุดการทดลอง ให้ค่า R^2 สูงและเข้าใกล้ 1 (0.9790 – 0.9986) และมีค่า %Error น้อยกว่าร้อยละ 10 รวมถึงมีค่า RMSE เพียง 5.01 – 17.57 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย รวมถึงสามารถอธิบายความสามารถในการย่อยสลาย ของวัสดุตั้งต้น (ค่าการปรับตัว (λ) และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (μ_m)) ได้ใกล้เคียงและ สอดคล้องกับลักษณะการเติบโตของเส้นกราฟผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทดลองของทั้ง 2 ชุดการทดลองได้เป็นอย่างดี (ภาพที่ 4.7 4.8 4.17 และ 4.18)

กล่าวโดยสรุป การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและ ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นต่อ ผลผลิตก๊าซมีเทน ทั้งในกรณีที่มีการควบคุมระบบและไม่มีการควบคุมระบบ (เติม/ไม่เติม โซเดียมไบคาร์บอเนต) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์ เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารช่วยปรับสมดุลสารอาหารหรืออัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้มีความ เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์ทุก ๆ กลุ่ม และมีการผลิตก๊าซ

มีเทนในอัตราที่เร็วกว่าการหมักโดยใช้เศษอาหารหรือผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นเพราะวัสดุตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะทางเคมีกายภาพที่ส่งเสริมซึ่งกันและกันในทางบวกต่อกระบวนการย่อยสลาย จึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดี อีกทั้งการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยเพิ่มอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นในอัตราส่วนที่สูงขึ้นก็สามารถช่วยส่งเสริมให้ระบบมีความเสถียรและมีการผลิตก๊าซมีเทนในอัตราที่เร็วมากยิ่งขึ้นด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ผลการศึกษาี้ก็สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในพัฒนาและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากของเสียประเภทเศษอาหารซึ่งในปัจจุบันมักถูกทิ้งร่วมกับผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม เพื่อให้ระบบมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยทำให้เกิดความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์จากการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ร่วมกัน ช่วยในการเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ช่วยในการเจรจาสารประกอบที่เป็นพิษ ช่วยปรับสมดุลของสารอาหารจากการปรับแต่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ก็ยังมีข้อได้เปรียบด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เช่น เป็นการเพิ่มทางเลือกในการจัดการกับมูลฝอยหรือวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ นอกเหนือจากการฝังกลบ การเผา หรือการหมักทำปุ๋ย สร้างรายได้เสริมจากผลผลิตก๊าซชีวภาพ ลดภาระค่าใช้จ่ายจากการใช้วัสดุคงเหลือที่ย่อยสลายแล้วทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยคอก หมุนเวียนพลังงานและลดการใช้พลังงานดั้งเดิมจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และเป็นแนวทางในการจัดการมูลฝอยหรือวัสดุประเภทสารอินทรีย์ได้อย่างยั่งยืน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์ในลักษณะการหมักแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ทราบถึงปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำและประเมินความคุ้มค่าต่อการนำไปใช้จริงในสเกลที่ใหญ่ขึ้น

2) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะการเจริญเติบโต/ปริมาณของจุลินทรีย์แบบจำเพาะเจาะจงในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การสร้างกรด (Acidogenesis) การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) และการสร้างมีเทน (Methanogenesis) เพื่อให้ทราบและอธิบายความสัมพันธ์ของกลุ่มจุลินทรีย์ในแต่ละขั้นตอนที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

3) ควรมีการศึกษาปริมาณและชนิดกรดไขมันระเหยง่ายซึ่งเป็นสารประกอบตัวกลางที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสร้างมีเทนแบบจำเพาะเจาะจง เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดพรอปิโอนิก (Propionic acid) กรดบิวทีริก (Butyric acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) เป็นต้น เพื่อให้ทราบและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายกับผลผลิตก๊าซมีเทนได้ชัดเจนมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- Abbas, R., Agha, A., & Rahman, S. (2018). Enhancement anaerobic digestion and methane production from kitchen waste by thermal and thermo-chemical pretreatments in batch leach bed reactor with down flow. *Research in Agricultural Engineering*, 64, 128-135. <https://doi.org/10.17221/16/2017-RAE>
- Abdulkarim, B. I., & Mohammed Evuti, A. (2010). Effect of buffer (NaHCO₃) and waste type in high solid thermophilic anaerobic digestion. *International Journal of ChemTech Research*, 2(2), 980-984.
- Aboudi, K., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L. I. (2015). Semi-continuous anaerobic co-digestion of sugar beet byproduct and pig manure: Effect of the organic loading rate (OLR) on process performance. *Bioresource Technology*, 194, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.031>
- Abouelenien, F., Namba, Y., Nishio, N., & Nakashimada, Y. (2016, Mar). Dry Co-Digestion of Poultry Manure with Agriculture Wastes. *Applied biochemistry and biotechnology*, 178(5), 932-946. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1919-1>
- Agyemang, K. B. (2021). *Anaerobic co-digestion of food waste and kraft pulp fibre to enhance digestate dewaterability* [Linköpings Universitet].
- Aichinger, P., Wadhawan, T., Kuprian, M., Higgins, M., Ebner, C., Fimml, C., Murthy, S., & Wett, B. (2015). Synergistic co-digestion of solid-organic-waste and municipal-sewage-sludge: 1 plus 1 equals more than 2 in terms of biogas production and solids reduction. *Water research*, 87, 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.033>
- Akhator, P., & Musa, B. (2022). Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Cow Dung in a Pilot Fixed-Dome Bio-digester for Biogas Production. *International Journal of Engineering Science and Application*, 6(3), 56-64.
- Akram, A., & Stuckey, D. C. (2008, Oct). Biomass acclimatisation and adaptation during start-up of a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR). *Environ Technol*, 29(10), 1053-1065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09593330802175856>

- Akyol, Ç. (2020). In search of the optimal inoculum to substrate ratio during anaerobic co-digestion of spent coffee grounds and cow manure. *Waste Management & Research*, 38(11), 1278-1283. <https://doi.org/10.1177/0734242X20914731>
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., & Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure--Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 173-182. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.007>
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. *Water research*, 28(3), 727-731. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90153-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90153-8)
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927-934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Anukam, A., Mohammadi, A., Naqvi, M., & Granström, K. (2019). A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency. *Processes*, 7, 504-523. <https://doi.org/10.3390/pr7080504>
- APHA, AWW, & WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (R. B. Baird, A. D. Eaton, & E. W. Rice, Eds. 23 ed.). American Public Health Association.
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., & Lens, P. N. L. (2014). Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied Energy*, 123, 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.035>
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Frunzo, L., Esposito, G., Lens, P. N. L., & Pirozzi, F. (2014). Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods. *Journal of Environmental Management*, 146, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.042>
- ASTM International. (2006). *Annual book of ASTM standards* (Vol. 11.04). ASTM International.

- Ayeni, A. O., Hymore, F., Mudliar, S., Deshmukh, S., Satpute, D., Omoleye, J., & Pandey, R. A. (2013). Hydrogen peroxide and lime based oxidative pretreatment of wood waste to enhance enzymatic hydrolysis for a biorefinery: Process parameters optimization using response surface methodology. *Fuel*, *106*, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.078>
- Azman, S., Khadem, A. F., van Lier, J. B., Zeeman, G., & Plugge, C. M. (2015). Presence and Role of Anaerobic Hydrolytic Microbes in Conversion of Lignocellulosic Biomass for Biogas Production. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *45*(23), 2523-2564. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1053727>
- Bacocchi, R., Carnevale, E., Costa, G., Gavasci, R., Lombardi, L., Olivieri, T., Zanchi, L., & Zingaretti, D. (2013). Performance of a biogas upgrading process based on alkali absorption with regeneration using air pollution control residues. *Waste Management*, *33*(12), 2694-2705. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.022>
- Bah, H., Zhang, W., Wu, S., Qi, D., Kizito, S., & Dong, R. (2014). Evaluation of batch anaerobic co-digestion of palm pressed fiber and cattle manure under mesophilic conditions. *Waste Management*, *34*(11), 1984-1991. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.015>
- Bajpai, P. (2017). Basics of Anaerobic Digestion Process. In J. Kacprzyk (Ed.), *Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry* (pp. 99). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4130-3_2
- Bedoić, R., Špehar, A., Puljko, J., Čuček, L., Čosić, B., Pukšec, T., & Duić, N. (2020). Opportunities and challenges: Experimental and kinetic analysis of anaerobic co-digestion of food waste and rendering industry streams for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *130*, 109951. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109951>
- Bergman, E. N. (1990). Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological Reviews*, *70*(2), 567-590. <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.2.567>

- Bernard, O., Polit, M., Hadj-Sadok, Z., Pengov, M., Dochain, D., Estaben, M., & Labat, P. (2001). Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: Software sensors and controllers for an anaerobic digester. *Water Science and Technology*, 43(7), 175-182. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0418>
- Bioenergie. (2019). *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2019*
https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/basisdaten_bioenergie_2019_web_03.pdf
- Bitton, G. (2005). Anaerobic Digestion of Wastewater and Biosolids. In G. Bitton (Ed.), (3 ed.). John Wiley & Sons.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., & Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*, 40(3), 989-995. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.03.007>
- Bramstedt, S. (2016). *Temperature Optimization of Anaerobic Digestion at the Käppala Waste Water Treatment Plant*. The Royal Institute of Technology.
- Briški, F., Vuković, M., Papa, K., Gomzi, Z., & Domanovac, T. (2007). Modelling of composting of food waste in a column reactor. *Chemical Papers*, 61(1), 24-29. <https://doi.org/10.2478/s11696-006-0090-0>
- Brown, D., & Li, Y. (2013). Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource Technology*, 127, 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.081>
- Brown, D., Shi, J., & Li, Y. (2012). Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. *Bioresource Technology*, 124, 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.051>
- Buendía, I. M., Fernández, F. J., Villaseñor, J., & Rodríguez, L. (2009). Feasibility of anaerobic co-digestion as a treatment option of meat industry wastes. *Bioresource Technology*, 100(6), 1903-1909. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.013>
- Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanity, K., & Forster, C. F. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*, 22(1), 71-77. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00057-5)

- Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., & Kumar, R. (2012). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. *Energy*, *43*(1), 273-282.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.029>
- Chen, S., Zhang, J., & Wang, X. (2015). Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste. *Waste Management & Research*, *33*(11), 1033-1040. <https://doi.org/10.1177/0734242x15602965>
- Chen, X., Yan, W., Sheng, K., & Sanati, M. (2014). Comparison of high-solids to liquid anaerobic co-digestion of food waste and green waste. *Bioresource Technology*, *154*, 215-221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.054>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, *99*(10), 4044-4064.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Cheng, X. Y., & Zhong, C. (2014). Effects of Feed to Inoculum Ratio, Co-digestion, and Pretreatment on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Cotton Stalk. *Energy & Fuels*, *28*(5), 3157-3166. <https://doi.org/10.1021/ef402562z>
- Cho, J. K., Park, S. C., & Chang, H. N. (1995). Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. *Bioresource Technology*, *52*(3), 245-253. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00031-9](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00031-9)
- Cuetos, M. J., Gómez, X., Otero, M., & Morán, A. (2010). Anaerobic digestion and co-digestion of slaughterhouse waste (SHW): Influence of heat and pressure pre-treatment in biogas yield. *Waste Management*, *30*(10), 1780-1789.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.034>
- de Lemos Chernicharo, C. A. (2007). *Anaerobic Reactors*. IWA Publishing.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and renewable Resources: An Introduction*. Wiley-VCH.
- Dobre, P., Nicolae, F., & Matei, F. (2014). Main factors affecting biogas production-An overview. *Romanian Biotechnological Letters*, *19*(3), 9283-9296.
- Drosg, B., Braun, R., Bochmann, G., & Al Saedi, T. (2013). 3 - Analysis and characterisation of biogas feedstocks. In A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter (Eds.), *The Biogas Handbook* (pp. 52-84). Woodhead Publishing.

- Edström, M., Nordberg, A., & Thyselius, L. (2003). Anaerobic Treatment of Animal Byproducts from Slaughterhouses at Laboratory and Pilot Scale. *Applied biochemistry and biotechnology*, 109(1-3), 127-138.
<https://doi.org/10.1385/ABAB:109:1-3:127>
- El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, 101(11), 4021-4028.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.027>
- Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 11, 325–341. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0352>
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates. *The Open Environmental Engineering Journal*, 5, 1-8. <https://doi.org/10.2174/1874829501205010001>
- Estevez, M. M., Sapci, Z., Linjordet, R., Schnürer, A., & Morken, J. (2014). Semi-continuous anaerobic co-digestion of cow manure and steam-exploded *Salix* with recirculation of liquid digestate. *Journal of Environmental Management*, 136, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.028>
- Fagbenro, J., & Oyeleye, B. (1999). Relationships between four methods of organic carbon determination in leaves of nitrogen-fixing trees and lignite-based organic fertilizers. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 30, 2345-2362.
<https://doi.org/10.1080/00103629909370378>
- Ferrer, I., Ponsá, S., Vázquez, F., & Font, X. (2008). Increasing biogas production by thermal (70°C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal*, 42(2), 186-192.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.06.020>

Filer, J., Ding, H. H., & Chang, S. (2019). Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research. *Water*, *11*, 921.

<https://doi.org/10.3390/w11050921>

Fujishima, S., Miyahara, T., & Noike, T. (2000). Effect of moisture content on anaerobic digestion of dewatered sludge: Ammonia inhibition to carbohydrate removal and methane production. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, *41*, 119-127.

<https://doi.org/10.2166/wst.2000.0063>

Gagliano, M. C., Braguglia, C. M., Gallipoli, A., Gianico, A., & Rossetti, S. (2015). Microbial diversity in innovative mesophilic/thermophilic temperature-phased anaerobic digestion of sludge. *Environmental Science and Pollution Research International*, *22*(10), 7339-7348. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3061-y>

Gandhi, B. P., Otite, S. V., Fofie, E. A., Lag-Brottons, A. J., Ezemonye, L. I., Semple, K. T., & Martin, A. D. (2022). Kinetic investigations into the effect of inoculum to substrate ratio on batch anaerobic digestion of simulated food waste.

Renewable Energy, *195*, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.134>

Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons.

Goswami, R., Chattopadhyay, P., Shome, A., Banerjee, S., Chakraborty, A., Mathew, A., & Chaudhury, S. (2016). An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: A step towards sustainable waste management. *3 Biotech*, *6*. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0395-9>

Gunaseelan, D. V. N. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, *26*, 389-399.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.006>

Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 1485-1496.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>

- Hansen, T. L., Schmidt, J. E., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J., Mosbaek, H., & Christensen, T. H. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management*, 24(4), 393-400. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.09.009>
- Hashimoto, A. G. (1983). Conversion of straw–manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. *Biotechnology and Bioengineering*, 25(1), 185-200. <https://doi.org/10.1002/bit.260250115>.
- Hashimoto, A. G. (1986). Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes. *Agricultural Wastes*, 17(4), 241-261. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(86\)90133-2](https://doi.org/10.1016/0141-4607(86)90133-2)
- Hawkes, D. L. (1980). Factors affecting net energy production from mesophilic anaerobic digestion. In D. A. Stratford, B. I. Wheatley, & D. E. Hughes (Eds.), *Anaerobic digestion* (pp. 131–150). Applied Science Publishers.
- Hegde, G., & Pullammanappallil, P. (2007). Comparison of Thermophilic and Mesophilic One-Stage, Batch, High-Solids Anaerobic Digestion. *Environmental Technology*, 28(4), 361-369. <https://doi.org/10.1080/09593332808618797>
- Hernandez-Berriel, M. C., Marquez-Benavides, L., Gonzalez-Perez, D. J., & Buenrostro-Delgado, O. (2008). The effect of moisture regimes on the anaerobic degradation of municipal solid waste from Metepec (Mexico). *Waste Manag*, 28 Suppl 1, S14-20. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.021>
- Hills, D. J. (1980). Biogas from a high solids combination of dairy manure and barley straw. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 23(6), 1500–1504
- Hills, D. J., & Roberts, D. W. (1981). Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues. *Agricultural Wastes*, 3(3), 179-189. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(81\)90026-3](https://doi.org/10.1016/0141-4607(81)90026-3)
- Huang, Z., Ong, S. L., & Ng, H. Y. (2011). Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling. *Water research*, 45(2), 705-713. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.035>

- Inanc, B., Matsui, S., & Ide, S. (1999). Propionic acid accumulation in anaerobic digestion of carbohydrates: An investigation on the role of hydrogen gas. *Water Science and Technology*, 40(1), 93-100. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00368-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00368-6)
- James, G. S. (2008). *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance*. McGraw-Hill Education.
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071490238>
- Kangle, K. M., Kore, S. V., Kore, V. S., & Kulkarni, G. S. (2011). Recent Trends in Anaerobic Codigestion: A Review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2, 210-219.
- Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J., & Rintala, J. A. (2002). Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch scale and farm-scale evaluation. *Water Science and Technology*, 45(10), 275–280. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0352>
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Khanal, S. K. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- Kim, J. K., Oh, B. R., Chun, Y. N., & Kim, S. W. (2006). Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 102(4), 328-332.
<https://doi.org/10.1263/jbb.102.328>
- Kothari, R., Pandey, D. A., Kumar, S., Tyagi, V., & Tyagi, S. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 174–195. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>
- Kugelman, I., & McCarty, P. (1965). Cation Toxicity and Stimulation in Anaerobic Waste Treatment. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 37(1), 97-116.
- Kwietniewska, E., & Tys, J. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 491-500.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.041>

- Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource Technology*, *102*(3), 2255-2264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035>
- Lay, J., Li, Y.-Y., & Noike, T. (1996). Effect of moisture content and chemical nature on methane fermentation characteristics of municipal solid wastes. *Journal of Environmental Science and Engineering*, *552*, 101-108.
- Lee, E., Bittencourt, P., Casimir, L., Jimenez, E., Wang, M., Zhang, Q., & Ergas, S. J. (2019). Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge. *Waste Management*, *95*, 432-439. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.033>
- Lee, J. P., Lee, J. S., & Park, S. C. (1999). Two-phase methanization of food wastes in pilot scale. *Applied biochemistry and biotechnology*, *79*(1), 585-593. <https://doi.org/10.1385/ABAB:79:1-3:585>
- Lehtomäki, A., Huttunen, S., & Rintala, J. A. (2007). Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling*, *51*(3), 591-609. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.11.004>
- Leitao, R., van Haandel, A. C., Zeeman, G., & Lettinga, G. (2006). The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. *Bioresource Technology*, *97*(9), 1105-1118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.007>
- Li, W. (2016). High-Solid Anaerobic Codigestion of Horse Manure and Grass in Batch and Semi-continuous Systems. *Energy & Fuels*, *30*(8), 6419-6424. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00551>
- Li, Y., Jin, Y., Li, H., Borrion, A., Yu, Z., & Li, J. (2018). Kinetic studies on organic degradation and its impacts on improving methane production during anaerobic digestion of food waste. *Applied Energy*, *213*, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.033>
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(1), 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>

- Li, Y. Y., Sasaki, H., Yamashita, K., Seki, K., & Kamigochi, I. (2002). High-rate methane fermentation of lipid-rich food wastes by a high-solids co-digestion process. *Water Science and Technology*, 45(12), 143-150. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0420>
- Liu, J., Olsson, G., & Mattiasson, B. (2004). A volumetric meter for monitoring of low gas flow rate from laboratory-scale biogas reactor. *Sensors and Actuators B-chemical*, 97, 369-372. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2003.09.014>
- Lossie, U., & Pütz, P. (2010). *Targeted control of biogas plants with the help of FOS/TAC*. Hach.
- Ma, X., Jiang, T., Chang, J., Tang, Q., Luo, T., & Cui, Z.-j. (2019). Effect of Substrate to Inoculum Ratio on Biogas Production and Microbial Community During Hemi-Solid-State Batch Anaerobic Co-digestion of Rape Straw and Dairy Manure. *Applied biochemistry and biotechnology*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03035-9>
- Macias-Corral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H., & Longworth, J. (2008, Nov). Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. *Bioresource Technology*, 99(17), 8288-8293. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.057>
- Manyi-Loh, C. E., Mamphweli, S. N., Meyer, E. L., Okoh, A. I., Makaka, G., & Simon, M. (2013). Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(9), 4390-4417. <https://doi.org/10.3390/ijerph10094390>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00023-7)

- Matheri, A. N., Sethunya, V. L., Belaid, M., & Muzenda, E. (2018). Analysis of the biogas productivity from dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 2328-2334. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.041>
- Maya-Altamira, L., Baun, A., Angelidaki, I., & Schmidt, J. E. (2008). Influence of wastewater characteristics on methane potential in food-processing industry wastewaters. *Water research*, *42*(8), 2195-2203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.11.033>
- McCarty, P. L. (1964). Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. *Public Work*, *95*, 91-126.
- Merlin, C., P., Gopinath, L. R., & Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *34*, 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010>
- Momoh, Y., & Nwaogazie, I. (2010). Effect of Waste Paper on Biogas Production from Co-digestion of Cow Dung and Water Hyacinth in Batch Reactors. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management (ISSN: 1119-8362) Vol 12 Num 4, 11*. <https://doi.org/10.4314/jasem.v11i4.55205>
- Monnet, F. (2003). *An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes*. R. Scotland. <https://www.cti2000.it/Bionett/BioG-2003-002%20IntroAnaerobicDigestion.pdf>
- Montañés, R., Pérez, M., & Solera, R. (2014). Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge and sugar beet pulp lixiviation in batch reactors: Effect of pH control. *Chemical Engineering Journal*, *255*, 492-499. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.074>
- Montgomery, H. A. C., Dymock, J. F., & Thom, N. S. (1962). The rapid colorimetric determination of organic acids and their salts in sewage-sludge liquor. *The Analyst*, *87*(1041), 949-955. <https://doi.org/10.1039/AN9628700949>

- Mursec, B., Vindis, P., Marjan, J., Brus, M., & Cus, F. (2009). Analysis of different substrates for processing into biogas. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 37(2), 652-659.
- Mussatto, S. I., & Teixeira, J. A. (2010). Lignocellulose as raw material in fermentation processes. In A. Méndez-Vilas (Ed.), *Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology* (Vol. 2, pp. 897-907). Spaon: Formatex Research Center.
- Náthia-Neves, G., Berni, M., Dragone, G., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2018). Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(9), 2033-2046. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1682-2>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). *Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
- Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>
- Neves, L., Oliveira, R., & Alves, M. M. (2009). Co-digestion of cow manure, food waste and intermittent input of fat. *Bioresource Technology*, 100(6), 1957-1962. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.030>
- Nges, I. A., & Liu, J. (2010). Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, 35(10), 2200-2206. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.022>
- Nielsen, H. B., & Angelidaki, I. (2008). Strategies for optimizing recovery of the biogas process following ammonia inhibition. *Bioresource Technology*, 99(17), 7995-8001. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.049>
- Noraini, M., Sanusi, S., Elham, J., Sukor, Z., & Halim, K. (2017). FACTORS AFFECTING PRODUCTION OF BIOGAS FROM ORGANIC SOLID WASTE VIA ANAEROBIC DIGESTION PROCESS: A REVIEW. *Solid State Science and Technology*, 25, 29-39.

- Ostrem, K. (2004). *Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic municipal wastes* [Columbia University]. New York, United States of America.
- Park, S., & Li, Y. (2012). Evaluation of methane production and macronutrient degradation in the anaerobic co-digestion of algae biomass residue and lipid waste. *Bioresource Technology*, 111, 42-48.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.160>
- Ponsá, S., Gea, T., & Sánchez, A. (2011). Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. *Biosystems Engineering*, 108(4), 352-360. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.01.007>
- Radu, T., Blanchard, R., Smedley, V., Wheatley, A., Abdul Salam, P., & Visvanathan, C. (2016, 14-16 September). Community scale, decentralised anaerobic digestion for energy and resource recovery. 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy, Thailand.
- Raposo, F., Borja, R., Martín, M. A., Martín, A., de la Rubia, M. A., & Rincón, B. (2009). Influence of inoculum–substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 149(1), 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.10.001>
- Raposo, F., de la Rubia, M. A., Borja, R., & Alaiz, M. (2008). Assessment of a modified and optimised method for determining chemical oxygen demand of solid substrates and solutions with high suspended solid content. *Talanta*, 76(2), 448-453.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.03.030>
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J., & Rico, J. L. (2015). High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*, 262, 794-802. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.050>
- Rozzi, A., & Remigi, E. (2004). Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: a literature review. *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, 3(2), 93-115. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-5762-z>

- Sahito, A. R., & Brohi, K. M. (2014). Anaerobic Co-digestion of canola straw and buffalo dung: optimization of methane production in batch experiments. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 33(1), 65-76.
- Samuel, J., Gujjala Lohit Kumar, S., & Rintu, B. (2017). Kinetic modeling of mixed culture process of anaerobic co-digestion of vegetable wastes with pistia stratiotes: A scientific attempt on biomethanation. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 9(1), 554-566. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000341>
- Sarker, S., Lamb, Hjelme, D., & Lien. (2019). A Review of the Role of Critical Parameters in the Design and Operation of Biogas Production Plants. *Applied Sciences*, 9, 1915. <https://doi.org/10.3390/app9091915>
- Schink, B. (1997). Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61(2), 262-280.
- Schnürer, A., & Jarvis, Å. (2009). *Microbiological Handbook for Biogas Plants-Swedish Waste Management U2009: 03, Swedish Gas Centre Report 207*. Avfall Sverige, Svenskt Gastekniskt Center AB.
- Siebert, I., & Banks, C. (2005). The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. *Process Biochemistry*, 40(11), 3412-3418. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.01.025>
- Sikora, A., Detman, A., Chojnacka, A., & Blaszczyk, M. (2017). Anaerobic Digestion: I. A Common Process Ensuring Energy Flow and the Circulation of Matter in Ecosystems. II. A Tool for the Production of Gaseous Biofuels. In A. F. Jozala (Ed.), *Fermentation Processes*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/64645>
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2008). *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory.
- Srikanlayanukul, M., & Suksabye, P. (2020). Effect of Mixture Ratio of Food Waste and Vetiver Grass on Biogas Production. *Applied Environmental Research*, 42(3), 40-48. <https://doi.org/10.35762/AER.2020.42.3.4>

- Sterling, M. C., Jr., Lacey, R. E., Engler, C. R., & Ricke, S. C. (2001). Effects of ammonia nitrogen of H₂ and CH₄ production during anaerobic digestion of dairy cattle manure. *Bioresour Technol*, 77(1), 9-18. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00138-3](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00138-3)
- Suarez, E., Tobajas, M., Mohedano, A. F., & de la Rubia, M. A. (2022). Energy recovery from food waste and garden and park waste: Anaerobic co-digestion versus hydrothermal treatment and anaerobic co-digestion. *Chemosphere*, 297, 134223. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134223>
- Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A., & Khanal, S. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Water Engineering Treatment and Reuse* (4 ed.). The McGraw-Hill Education.
- TheWorldCounts. (2022). *Global energy consumption*. <https://www.theworldcounts.com/challenges/energy/global-energy-consumption>
- Trzcinski, A. P. (2009). *Anaerobic Membrane Bioreactor Technology for Solid Waste Stabilization* [The Diploma of Imperial College]. London, United Kingdom.
- Twyman, R. M. (2005). *Sample Dissolution for Elemental Analysis: Wet Digestion* (2 ed., Vol. 8). Elsevier Science.
- USEPA. (2001). *METHOD 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids*. United States Environment Protection Agency.
- Van Lier, J. B., Mahmoud, N., & Zeeman, G. (2008). Anaerobic Wastewater Treatment. In *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design* (pp. 401-442.). International Water Association.
- Vanwonterghem, I., Jensen, P. D., Rabaey, K., & Tyson, G. W. (2015). Temperature and solids retention time control microbial population dynamics and volatile fatty acid production in replicated anaerobic digesters. *Scientific Reports*, 5(1), 8496. <https://doi.org/10.1038/srep08496>

- Verma, S. (2002). *Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes* [Columbia University]. New York, United States of America.
- Viturtia, A. M., Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., & Fazzini, G. (1989). Two-phase anaerobic digestion of a mixture of fruit and vegetable wastes. *Biological Wastes*, 29(3), 189-199. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(89\)90130-4](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90130-4)
- Walker, M., Zhang, Y., Heaven, S., & Banks, C. (2009). Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes. *Bioresource Technology*, 100(24), 6339-6346. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.018>
- Wang, B. (2016). *Factors that influence the biochemical methane potential (BMP) test: Steps towards the standardisation of BMP test* [Lund University]. Sweden.
- Wang, B., Nges, I. A., Nistor, M., & Liu, J. (2014). Determination of methane yield of cellulose using different experimental setups. *Water Science and Technology*, 70(4), 599-604. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.275>
- Wang, H., Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2016). Ammonia inhibition on hydrogen enriched anaerobic digestion of manure under mesophilic and thermophilic conditions. *Water research*, 105, 314-319. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.006>
- Wang, J., Gao, M., Wang, Q., Zhang, W., & Shirai, Y. (2016). Pilot-scale Open Fermentation of Food Waste to Produce Lactic Acid without Inoculum Addition. *RSC Advances*, 6, 104354-104358. <https://doi.org/10.1039/C6RA22760K>
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Yang, Q., Wu, B., Yao, F., He, L., Chen, F., Ma, Y., Shu, X., Hou, K., Wang, D., & Li, X. (2019). Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(4), 771-793. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09515-y>
- Ye, J., Li, D., Sun, Y., Wang, G., Yuan, Z., Zhen, F., & Wang, Y. (2013). Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure. *Waste Management*, 33(12), 2653-2658. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.014>

- Yen, H.-W., & Chiu, C.-H. (2007). The influences of aerobic-dark and anaerobic-light cultivation on CoQ10 production by *Rhodobacter sphaeroides* in the submerged fermenter. *Enzyme and Microbial Technology*, 41(5), 600-604.
<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.05.005>
- Yong, Z., Dong, Y., Zhang, X., & Tan, T. (2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Renewable Energy*, 78, 527-530.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.033>
- Yoon, S.-H., Kim, H.-S., & Yeom, I.-T. (2004). The Optimum Operational Condition of Membrane Bioreactor (MBR). *Water research*, 38, 37-46.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.09.001>
- Yu, D., Kurota, J. M., Lähde, K., Kymäläinen, M., Sinkkonen, A., & Romantschuk, M. (2014). Biogas production and methanogenic archaeal community in mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion processes. *Journal of Environmental Management*, 143, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.025>
- Zahan, Z., Othman, M. Z., & Muster, T. H. (2018). Anaerobic digestion/co-digestion kinetic potentials of different agro-industrial wastes: A comparative batch study for C/N optimisation. *Waste Management*, 71, 663-674.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.014>
- Zehra, A., Upadhyay, R. S., & Ahmad, A. (2019). Biological Treatment of Waste: An Overview. In R. P. Singh, V. Prasad, & B. Vaish (Eds.), *Advances in Waste-to-Energy Technologies*. Taylor & Francis Group.
- Zeshan, Karthikeyan, O. P., & Visvanathan, C. (2012). Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester. *Bioresource Technology*, 113, 294-302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.028>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., & Tan, T. (2013). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, 129, 170-176.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.138>

- Zhang, L., Lee, Y.-W., & Jahng, D. (2011). Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. *Bioresource Technology*, 102(8), 5048-5059. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.082>
- Zhang, P., Zeng, G., Zhang, G., Li, Y., Zhang, B., & Fan, M. (2008). Anaerobic co-digestion of biosolids and organic fraction of municipal solid waste by sequencing batch process. *Fuel Processing Technology*, 89, 485-489. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.11.013>
- Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., & Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 98(4), 929-935. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.039>
- Zhang, Z., Zhang, G., Li, W., Li, C., & Xu, G. (2016). Enhanced biogas production from sorghum stem by co-digestion with cow manure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(21), 9153-9158. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.042>





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายละเอียดการเตรียมเศษอาหารแบบแห้งก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

การเตรียมเศษอาหารแบบแห้ง

เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของ MEMMERT รุ่น UF5
3. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
4. โกร่งบดยาเซรามิก ขนาด 160 มิลลิเมตร (Pestle & Mortar)
5. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของ WEIFO รุ่น DRY-60
6. ถุงซิปล็อคพลาสติกใส (Zip lock bag)

วิธีการเตรียมเศษอาหารแบบแห้ง

1. ตักเศษอาหารส่งเคราะห์ที่ผ่านการทำการจัดเตรียมและจัดทำตามสัดส่วนที่ระบุไว้ (บทที่ 3, หัวข้อ 3.3.1) ลงในถ้วยกระเบื้อง (ภาพที่ ก.1)
2. นำถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่ไประเหยน้ำให้แห้งบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
3. อบถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ
4. บดเศษอาหารแห้งให้ละเอียดด้วยโกร่งบดยาเซรามิก (ภาพที่ ก.2)
5. อบเศษอาหารบดละเอียดที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ
6. ทำการเก็บรักษาเศษอาหารแบบแห้งและบดละเอียดไว้ในถุงพลาสติก เพื่อรอนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ ได้แก่ อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น ฟอสฟอรัสทั้งหมด ซีไอที และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ภาพที่ ก.1

ลักษณะของเศษอาหารลิงเคราะห์



(ก) ก่อนบดละเอียด



(ข) หลังบดละเอียด

ภาพที่ ก.2

ลักษณะเศษอาหารแบบแห้ง



(ก) ก่อนบดละเอียด



(ข) หลังบดละเอียด



ภาคผนวก ข

รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหาร

1. ระดับค่าพีเอช (pH)

การวัดระดับค่าพีเอชทำโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า (Electrometric method) ตามที่ระบุใน APHA et al. (2017)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของบริษัท accumet™ รุ่น AB150
2. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 25 มิลลิลิตร
3. กระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 4
2. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 7
3. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 9

วิธีวิเคราะห์

1. สอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดพีเอชด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่พีเอช 4 7 และ 9
2. ตักเศษอาหารส่งเคราะห์ใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร และวัดค่าพีเอชโดยใช้เครื่องวัดพีเอช

2. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดทำโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยง่ายและของแข็งคงตัวทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตามวิธีที่ระบุอยู่ในวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของ APHA et al. (2017) และ USEPA (2001)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
3. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
4. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 25 มิลลิลิตร
5. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
6. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
7. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของบริษัท WEIFO รุ่น DRY-60

วิธีวิเคราะห์

ก. ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

1. อบปีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_{beaker}
2. ตักตัวอย่างเศษอาหาร จำนวน 15 มิลลิลิตร (Sample volume) ใส่ลงในปีกเกอร์ที่ผ่านการอบแล้ว
3. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างเศษอาหารและปีกเกอร์ บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_{food}

ข. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

1. เผาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเตาเผา
2. ปล่อยให้ถ้วยกระเบื้องให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_{dish}
3. เทตัวอย่างเศษอาหารที่อยู่ในปีกเกอร์จากข้อ ก.3 (W_{food}) ลงในถ้วยกระเบื้องที่ผ่านการเผาแล้ว รินปีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่น

4. นำถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่ไประเหยน้ำให้แห้งบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
5. อบอุ่นถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ
6. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่ บนตีกน้ำหนัก
7. นำถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่มาอบต่อ ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบนตีกน้ำหนัก

ทำซ้ำขั้นตอนการอบ (1 ชั่วโมง) การปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ และการชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากกว่าร้อยละ 4 หรือ 50 มิลลิกรัม (เลือกใช้เกณฑ์ที่มีค่าน้อยกว่า) บนตีกน้ำหนักเป็น W_{total}

ค. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

1. นำถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่ (ข.7) เข้าเตาเผาขณะอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นอุณหภูมิห้อง แล้วตั้งอุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเป็น 550 ± 25 องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 1 ชั่วโมง

2. ปล่อยให้ถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบนตีกน้ำหนัก

3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีเศษอาหารบรรจุอยู่มาเผาอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส โดยนำเข้าเตาเผาขณะอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นอุณหภูมิห้อง แล้วตั้งอุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเป็น 550 ± 25 องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 30 นาที ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบนตีกน้ำหนัก

ทำซ้ำขั้นตอนการเผา (30 นาที) การปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ และการชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากกว่าร้อยละ 4 หรือ 50 มิลลิกรัม (เลือกใช้เกณฑ์ที่มีค่าน้อยกว่า) บนตีกน้ำหนักเป็น $W_{volatile}$

การคำนวณ

ก. ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

$$\text{Bulk density (g/L)} = \frac{(W_{\text{food}} - W_{\text{beaker}})}{\text{Sample volume}} \times 1,000$$

โดยที่ W_{food} = น้ำหนักตัวอย่างและบีกเกอร์ (กรัม)
 W_{beaker} = น้ำหนักบีกเกอร์หลังอบ (กรัม)
 Sample volume = น้ำหนักตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

ข. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

1. ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$\text{Total solids (mg/L)} = \frac{(W_{\text{total}} - W_{\text{dish}})}{\text{Sample volume}} \times 1,000$$

โดยที่ W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

W_{dish} = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

Sample volume = น้ำหนักตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

2. ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)

$$\% \text{Total solids} = \frac{\text{Total solids}}{\text{Bulk density} \times 1,000} \times 100$$

ค. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids)

1. ของแข็งระเหยง่าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$\text{Volatile solids (mg/L)} = \frac{(W_{\text{total}} - W_{\text{volatile}})}{\text{Sample volume}} \times 1,000$$

โดยที่ W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

W_{volatile} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

Sample volume = น้ำหนักตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

2. ของแข็งระเหยง่าย (ร้อยละ)

$$\% \text{Volatile solids} = \frac{\text{Volatile solids}}{\text{Bulk density} \times 1,000} \times 100$$

ง. ของแข็งคงตัว (Fixed solids)

1. ของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$\text{Fixed solids (mg/L)} = \frac{(W_{\text{volatile}} - W_{\text{dish}})}{(W_{\text{total}} - W_{\text{dish}})} \times 1,000$$

โดยที่ W_{volatile} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

W_{dish} = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

2. ของแข็งคงตัว (ร้อยละ)

$$\% \text{Fixed solids} = \frac{\text{Fixed solids}}{\text{Bulk density} \times 1,000} \times 100$$



3. อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทำโดยการออกซิไดซ์อินทรีย์คาร์บอนด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในกรดเข้มข้น แล้ววิเคราะห์ไดโครเมต ($Cr_2O_7^{2-}$) ที่เหลือ (Walkley and Black method) ตามที่ระบุใน Nelson and Sommers (1996) และคำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้ Oxidation factor ตามที่ระบุใน Fagbenro and Oyeleye (1999)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME3002
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
5. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
6. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
7. ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask)
8. ปีกเกอร์ (Beaker)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98
2. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate solution) 1.0 นอร์แมล
ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) เกรดสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 49.04 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
3. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun indicator solution)
ละลาย 1,10-ฟีแนนโทลีนโมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate, $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) จำนวน 1.485 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Ferrous sulfate heptahydrate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) จำนวน 695 มิลลิกรัม ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

4. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล

ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 196 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป จำนวน 20 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตนี้ต้องทำการเทียบมาตรฐาน (Standardize) กับสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้ง ก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์แมล จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 40 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล
- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จากสูตร

$$N_{\text{FAS}} = \frac{20 \text{ ml} \times 1 \text{ N}}{V_{\text{FAS}} \text{ (ml)}}$$

โดยที่ N_{FAS} = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) (นอร์แมล)

V_{FAS} = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง จำนวน 0.05 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1.0 นอร์แมล ลงในขวดชมพู จำนวน 20 มิลลิลิตร แก้วขวดชมพูเบา ๆ ให้ฟางข้าวผสมกับสารละลาย
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 40 มิลลิลิตร โดยเร็ว ให้กรดผสมกับสารละลายตัวอย่างโดยตรง แก้วขวดชมพูเบา ๆ ให้สารละลายตัวอย่างผสมเข้ากันดี เป็นเวลา 1 นาที
4. ตั้งขวดชมพูทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ทำปฏิกิริยา
5. เติมน้ำกลั่น จำนวน 100 มิลลิลิตร
6. หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด

7. ไทเทรตสารละลายในขวดชมพู ด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล เมื่อสารละลายใกล้ถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเข้ม ที่จุดนี้ค่อย ๆ เติมสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปช้า ๆ (ทีละหยด) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวอมน้ำเงินเป็นสีน้ำตาลแกมแดง

8. เมื่อพบว่าปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตอยู่ระหว่าง 0 – 8 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่ โดยลดน้ำหนักตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง หรือพบว่าปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตเท่ากับหรือมากกว่า 34 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่เช่นกัน โดยเพิ่มน้ำหนักตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งให้มากขึ้น

9. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ 2. – 7.) บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

การคำนวณ

$$\% \text{Organic carbon} = \frac{(T_1 - T_2) \times N_{\text{FAS}} \times 0.003 \times O_f}{W_{\text{solid sample}}} \times 100$$

โดยที่	T_1	= ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)
	T_2	= ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
	N_{FAS}	= ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (นอร์แมล)
	0.003	= น้ำหนักสมมูลของคาร์บอน (กรัม)
	O_f	= Oxidation factor (เท่ากับ 1.4550)
	$W_{\text{solid sample}}$	= น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

4. ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)

การหาปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นมีขั้นตอนการวิเคราะห์ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การย่อย (Digestion) การกลั่น (Distillation) และการไทเทรต (Titration) มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังระบุใน ASTM International (2006)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME3002
3. หลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. เตาย่อยเทคโนโลยีอินฟราเรด (Rapid digestion system) แบบ 12 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น TT125
5. เครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ (Automatic steam distillation) ของบริษัท Gerhardt รุ่น VA820
6. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
7. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
8. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
9. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
10. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
11. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
12. ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask)
13. ปีกเกอร์ (Beaker)
14. กระบอกตวง (Cylinder)
15. กระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารผสมเร่งปฏิกิริยา (Catalyst mixture)
ในที่นี้ใช้สารผสมเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า Kjelblet ของ OSKON CO., LTD มีอัตราส่วนระหว่าง $K_2SO_4 : CuSO_4 \cdot 5H_2O$ เท่ากับ 9 : 1
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98

3. สารละลายต่าง (Alkali solution) ร้อยละ 50

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 500 กรัม ในน้ำกลั่น ประมาณ 800 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในบีกเกอร์ (เตรียมในตู้ดูดควัน และวางบีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้จะร้อนมาก) เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติก ที่มีฝาเกลียว

4. สารละลายกรดบอริก (Boric acid) ร้อยละ 5

ละลายกรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3) จำนวน 50 กรัม ลงในน้ำกลั่น ตั้งบนเครื่องให้ความร้อน เปิดความร้อนให้กรดบอริกละลาย ปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

5. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)

ละลายเมทิลเรด (Methyl red, $C_{15}H_{15}N_3O_2$) จำนวน 0.125 กรัม และเมทิลีนบลู (Methylene blue, $C_{16}H_{18}ClN_3S$) จำนวน 0.083 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในขวดปรับปริมาตร (สารละลายนี้ต้องเตรียมใหม่ทุก ๆ 2 เดือน)

6. สารละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (Methyl red indicator)

ละลายเมทิลเรด (Methyl red, $C_{15}H_{15}N_3O_2$) จำนวน 0.1 กรัม ลงในเอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในขวดปรับปริมาตร

7. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (Standard sulfuric acid) 0.1 นอร์แมล

ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 3 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติ ดังนี้

- ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ประมาณ 0.008 – 0.04 กรัม ใส่ลงในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50.0 มิลลิลิตร เขย่าจนสารละลายหมด ปิเปตสารละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ จำนวน 300 ไมโครลิตร ลงในขวดชมพู่
- นำไปไทเทรตกับสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดง
- นำขวดชมพู่ไปต้มให้สารละลายเดือดเป็นเวลา 2 นาที สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง
- ใช้น้ำหล่อเย็นด้านนอกของขวดชมพู่ จนสารละลายมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
- ไทเทรตต่อกับสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล จนได้สารละลายสีแดง

- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกจากสูตรต่อไปนี้ โดยใช้ น้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ของโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 53.0 กรัม โซเดียมคาร์บอเนตต่ออควิวาเลนต์ (53 g Na₂CO₃/eq)

$$N_{\text{Sulfuric acid}} = \frac{A \text{ g Na}_2\text{CO}_3}{B \text{ ml H}_2\text{SO}_4} \times \frac{\text{eq}}{53 \text{ g Na}_2\text{CO}_3} \times \frac{1000 \text{ ml}}{L}$$

โดยที่ $N_{\text{Sulfuric acid}}$ = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริก (นอร์แมล)
 A = น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต (กรัม)
 B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

วิธีวิเคราะห์

ก. การย่อย

1. ชั่งตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง จำนวน 0.5 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง
2. ใส่สารผสมเร่งปฏิกิริยา (Kjelblet) จำนวน 2 เม็ด (น้ำหนักเม็ดละประมาณ 3.5 กรัม)
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 20 มิลลิลิตร ในตู้ดูดควัน โดยค่อย ๆ เติมกรดให้ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง และแกว่งหลอดแก้วเบา ๆ ให้ตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งผสมกับกรด
4. วางหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างลงในที่วางหลอดทดลอง (Insert rack) แล้วต่อเข้ากับชุดดูดไอกรด (Waste gas collection hood)
5. วางที่วางหลอดทดลองลงในเตาย่อยเทคโนโลยีอินฟราเรดเพื่อให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใสมีสีเขียวอมฟ้า
6. ปลอຍตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
7. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 มิลลิลิตร แกว่งให้สารละลายผสมกันดี
8. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ ก.2. – ก.7.)

ข. การกลั่น

1. เปิดเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติให้พร้อมใช้งานและตั้งค่าเวลาการกลั่น เป็นเวลา 300 วินาที ต่อสายยางของเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติเข้ากับขวดพลาสติกเก็บสารละลายต่าง จากนั้นเปิดน้ำเย็นผ่านเข้าเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ

2. ปิเปตสารละลายกรดบอริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายอินดิเคเตอร์ผสม จำนวน 300 ไมโครลิตร ลงในขวดชมพู จากนั้นนำไปวางตรงตำแหน่งที่รองรับก๊าซแอมโมเนียจากการกลั่น โดยให้ปลายสายยางของชุดควบแน่นจุ่มอยู่ในสารละลาย
4. นำหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างจากขั้นตอนการย่อย (ก.7.) ต่อเข้ากับเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ จากนั้นกดปุ่มเติมสารละลายต่างอย่างช้า ๆ (NaOH) ประมาณ 50 มิลลิลิตร หรือจนกว่าสารละลายภายในหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างมีสีดํา
5. กดปุ่มเริ่มการทำงานของเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ (Run)
6. นำสารละลายที่กลั่นได้ (Distillate) ปริมาตรประมาณ 100 – 150 มิลลิลิตร ไปทำการไทเทรตในขั้นตอนต่อไป
7. กลั่นชุดควบคุม (Blank) และนำไปไทเทรตเช่นเดียวกับชุดตัวอย่าง

ค. การไทเทรต

ไทเทรตสารละลายในขวดชมพูที่กลั่นได้จากขั้นตอนการกลั่น (ข.6.) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล เมื่อถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีม่วงอ่อน (Pale lavender)

การคำนวณ

$$\% \text{Total Kjeldahl Nitrogen} = \frac{(A - B) \times N \times 0.014}{C} \times 100$$

- โดยที่
- A = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)
 - N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (นอร์แมล)
 - C = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัมของแข็งทั้งหมด)

5. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus)

การหาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดประกอบด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดผสมระหว่าง HNO_3 : H_2SO_4 : HClO_4 อัตราส่วน 3 : 1 : 1 ตามที่ระบุใน Twyman (2005) และการทำให้เกิดสีเพื่อหาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธีวานาโดโมลิบโดฟอสฟอริกแอซิด (Vanadomolybdophosphoric acid method) ตามที่ระบุใน Nelson and Sommers (1996)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME3002
3. หลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 300 มิลลิลิตร
4. เตาย่อยเทคโนโลยีอินฟราเรด (Rapid digestion system) แบบ 12 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น TT125
5. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
6. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
7. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
8. ชุดกรองบุชเนอร์ (Buchner filtration apparatus)
9. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
10. กระบอกตวง (Cylinder)
11. ขวดخمพู่ (Erlenmeyer flask)
12. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
13. กระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. กรดไนตริกเข้มข้น (Nitric acid, HNO_3) ร้อยละ 65
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98
3. กรดเพอร์คลอริกเข้มข้น (Perchloric acid, HClO_4) ร้อยละ 70 – 72

4. สารละลายแอมโมเนียมโพลิบเดต (สารละลาย A)
ละลายแอมโมเนียมโพลิบเดตเตตระไฮเดรต (Ammonium molybdate tetrahydrate, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 25 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 400 มิลลิลิตร
5. สารละลายแอมโมเนียมวานาเดต (สารละลาย B)
ละลายแอมโมเนียมวานาเดต (Ammonium vanadate, NH_4VO_3) จำนวน 1.25 กรัม ในน้ำร้อนประมาณ 300 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
6. สารละลายรวม (Mixed reagent)
ถ่ายสารละลาย B (ข้อ 5.) ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 จำนวน 250 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ และแกว่งให้สารละลายผสมกัน ปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง จากนั้นถ่ายสารละลาย A (ข้อ 4.) ลงไป และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร (มีอายุการใช้งาน 4 ชั่วโมง)
7. สารละลายกรดเพอร์คลอริก 2 นอร์แมล
ปิเปตกรดเพอร์คลอริกเข้มข้นร้อยละ 70 – 72 จำนวน 170 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร
8. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (Standard phosphorus) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
ละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4) จำนวน 0.2197 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

ก. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 0 2 4 6 8 และ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายรวม (Mixed reagent) จำนวน 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายกรดเพอร์คลอริก 2 นอร์แมล จำนวน 10 มิลลิลิตร (หรือเติมเท่ากับปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (Aliquot used)) ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ตั้งไว้เพื่อให้เกิดสีอย่างน้อย 20 นาที ชุดสารละลายมาตรฐานจะมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
2. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

ข. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. การย่อย

1.1 ชั่งตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง จำนวน 0.5 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง

1.2 เติมนครดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 จำนวน 15 มิลลิลิตร โดยให้นครดไนตริกเข้มข้นค่อย ๆ ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่างและชะล้างตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งที่ติดอยู่บริเวณคอขวดให้ไหลลงไปหลอดแก้ว

1.3 วางหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างลงในที่วางหลอดทดลอง (Insert rack) และต่อเข้ากับชุดดูดไอกรด (Waste gas collection hood)

1.4 วางที่วางหลอดทดลองลงในเตาย่อยเทคโนโลยีอินฟราเรดเพื่อให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งขณะต้มย่อยตัวอย่างด้วยนครดไนตริกเข้มข้น จะสังเกตเห็นควันสีเหลืองส้มเกิดขึ้นค่อนข้างหนาแน่นในช่วงแรก ย่อยต่อไปจนควันสีเหลืองจางลง และปริมาตรสารละลายตัวอย่างลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.5 หยุดการต้มย่อย ปลอ่ยตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

1.6 เติมนครดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 5 มิลลิลิตร และเติมนครดเพอร์คลอริกเข้มข้นร้อยละ 70 – 72 จำนวน 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ

1.7 แก้วหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่างเบา ๆ ให้สารละลายผสมเข้ากันดี

1.8 ต้มย่อยต่อโดยใช้ความร้อนที่สูงขึ้น ในช่วงแรกของการต้มย่อยในขั้นตอนนี้ จะสังเกตเห็นควันสีเหลืองส้ม ต่อมาควันจะมีลักษณะเป็นสีขาว ต้มย่อยต่อจนได้สารละลายใสและมีปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.9 หยุดการต้มย่อย ปลอ่ยตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

1.10 เติมน้ำกลั่น ประมาณ 30 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวง โดยเติมให้ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่าง แล้วต้มย่อยต่อด้วยความร้อนต่ำลง จนสังเกตเห็นควันขาวหนาที่บและปริมาตรของสารละลายลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.11 เติมน้ำกลั่น ประมาณ 15 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวง โดยเติมให้ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่าง และแก้วหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่างเบา ๆ ให้สารละลายผสมเข้ากันดี

1.12 กรองสารละลายตัวอย่างด้วยชุดกรองบุชเนอร์ โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ถายน้ำกรองลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. การทำให้เกิดสีและการวัดค่าการดูดกลืนแสง

2.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร หรือจำนวนอื่น ๆ (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายตัวอย่าง)

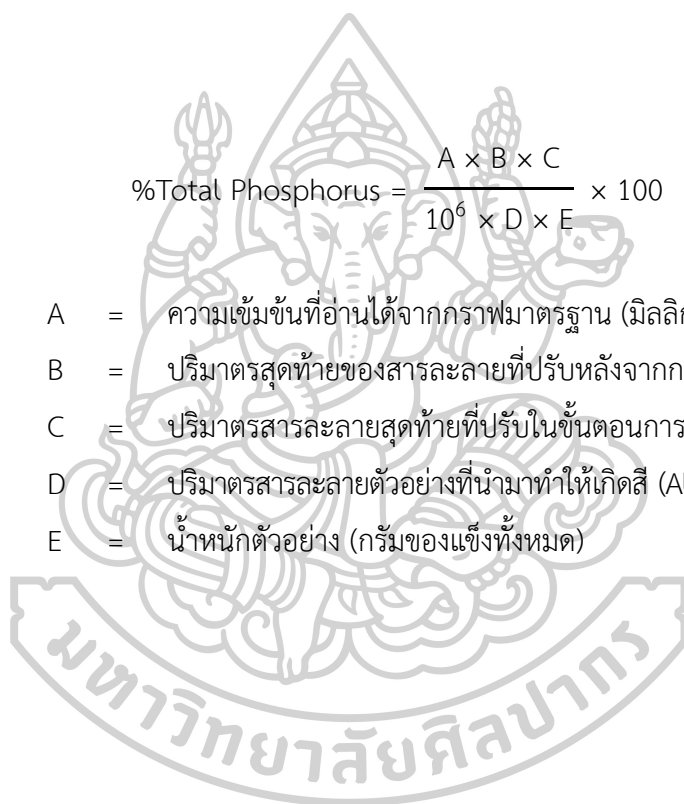
2.2 เติมสารละลายรวม (Mixed reagent) จำนวน 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้สารละลายผสมเข้ากันดีและตั้งไว้ให้เกิดสีอย่างน้อย 20 นาที

2.3 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

การคำนวณ

$$\% \text{Total Phosphorus} = \frac{A \times B \times C}{10^6 \times D \times E} \times 100$$

- โดยที่
- A = ความเข้มข้นที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - B = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายที่ปรับหลังจากการย่อย (มิลลิลิตร)
 - C = ปริมาตรสารละลายสุดท้ายที่ปรับในขั้นตอนการทำให้เกิดสี (มิลลิลิตร)
 - D = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่นำมาทำให้เกิดสี (Aliquot used) (มิลลิลิตร)
 - E = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัมของแข็งทั้งหมด)



6. ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในที่นี้เป็น การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของแข็ง (Solid substrate) โดยใช้วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux method) ตามที่ระบุใน Raposo et al. (2008)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME3002
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
5. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
6. เตาให้ความร้อน (Multi heating mantles) แบบหลุม 6 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น KI 26
7. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
8. ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
9. ชุดกลั่นแบบไหลกลับ (Reflux distillation)
10. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
11. ปีกเกอร์ (Beaker)
12. เม็ดแก้ว (Glass beads)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98
2. สารละลายสำหรับการย่อยสลาย (Digestion reagent)

ละลายเมอคิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate, $HgSO_4$) จำนวน 33.3 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 600 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป 167 มิลลิลิตร หลังจากนั้นละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) เกรดสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 58.844 กรัม แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

3. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid reagent)

ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate, AgSO_4) จำนวน 10 กรัม ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 1000 มิลลิลิตร

4. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate solution) 1.0 นอร์แมล

ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 49.13 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป 167 มิลลิลิตร แกว่งผสมให้โพแทสเซียมไดโครเมตละลายจนหมด ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

5. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroin indicator solution)

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทลีนโมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 1.485 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Ferrous sulfate heptahydrate, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 695 มิลลิกรัม ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

6. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล

ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 196.11 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป จำนวน 40 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตนี้ต้องทำการเทียบมาตรฐาน (Standardize) กับสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้ง ก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์แมล จำนวน 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไป 60 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 30 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล
- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จากสูตร

$$N_{\text{FAS}} = \frac{10 \text{ ml} \times 1 \text{ N}}{V_{\text{FAS}}}$$

โดยที่ N_{FAS} = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) (นอร์แมล)

V_{FAS} = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

7. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP) 0.0416 นอร์แมล

ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, $KHC_8H_4O_4$) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 8.50 กรัม ในน้ำกลั่น ประมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายนี้มีค่าซีไอดีตามทฤษฎีเท่ากับ 10,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร และมีอายุการใช้งาน 1 สัปดาห์ หากเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง จำนวน 0.05 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในขวดกั่นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้วลงไป 4 – 5 เม็ด
2. ปิเปิดน้ำกลั่น จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดกั่นกลม
3. ปิเปิดสารละลายสำหรับการย่อยสลาย จำนวน 20 มิลลิลิตร และค่อย ๆ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก จำนวน 30 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ แก้วขวดกั่นกลมให้สารละลายผสมกันดี
4. ต่อขวดกั่นกลมเข้ากับชุดกลั่นแบบไหลกลับ และวางขวดกั่นกลมบนเตาให้ความร้อนพร้อมเปิดน้ำเย็นเข้าสู่ชุดกลั่นแบบไหลกลับ
5. ปิดปลายด้านบนของเครื่องควบแน่น (Condenser) ด้วยปีกเกอร์ขนาดเล็ก เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งอื่นใดตกลงไปผสมกับสารละลายในขวดกั่นกลม จากนั้นทำการต้มตัวอย่างในขวดกั่นกลมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
6. ฉีดล้างส่วนที่ค้างอยู่ในเครื่องควบแน่นด้วยน้ำกลั่น ลงไปในขวดกั่นกลม (ฉีดล้างจำนวน 3 รอบ) และนำขวดกั่นกลมออกจากเตาให้ความร้อน
7. เติมน้ำกลั่นเพิ่มประมาณ 90 มิลลิลิตร ลงไปในขวดกั่นกลม หยดเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตสารละลายในขวดกั่นกลมกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์แมล เมื่อใกล้ถึงจุดยุติ สารละลายในขวดกั่นกลมจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวเข้ม ที่จุดนี้ค่อย ๆ เติมสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปช้า ๆ (ทีละหยด) จนกระทั่งสารละลายในขวดกั่นกลม

เปลี่ยนจากสีเขียวอมน้ำเงินเป็นสีน้ำตาลแกมแดง บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

8. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง (ข้อ 2. – 7.) บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

การตรวจสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีวิเคราะห์

การตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ปฏิบัติโดยการใช้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนทาเลต (KHP) ความเข้มข้น 0.0416 นอร์แมล ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลม และปฏิบัติตามวิธีวิเคราะห์ข้อ 2. – 7. และประเมินความเที่ยงและความแม่นยำของค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้เทียบกับค่าตามทฤษฎี

การคำนวณ

$$\text{COD (mg O}_2\text{ g}^{-1}\text{VS)} = \frac{(\text{FAS}_{\text{blank}} - \text{FAS}_{\text{solid sample}}) \times \text{N}_{\text{FAS}} \times 8}{\text{W}_{\text{solid sample}}}$$

โดยที่	COD	=	ปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand) (มิลลิกรัม ออกซิเจนต่อกรัมของแข็งระเหย)
	$\text{FAS}_{\text{blank}}$	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)
	$\text{FAS}_{\text{solid sample}}$	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับชุดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
	N_{FAS}	=	ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (นอร์แมล)



ภาคผนวก ค

รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ
ของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

1. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดทำโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยง่ายและของแข็งคงตัวทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตามวิธีที่ระบุอยู่ในวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของ APHA et al. (2017) และ USEPA (2001)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
3. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
4. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
5. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของบริษัท WEIFO รุ่น DRY-60

วิธีวิเคราะห์

ก. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

1. เมาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเตาเผา
2. ปลอ่ยถ้วยกระเบื้องให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนัก เป็น W_{dish}
3. ใส่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 1.0 กรัม ลงในถ้วยกระเบื้องที่ผ่านการเผาแล้ว จากนั้นชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารและถ้วยกระเบื้อง บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_{sample} (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10)
4. นำถ้วยกระเบื้องที่มีผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่ในอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปลอ่ยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ
5. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่ บันทึกน้ำหนัก

6. นำถ้วยกระเบื้องที่มีผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่มาอบต่อ ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

ทำซ้ำขั้นตอนการอบ (1 ชั่วโมง) การปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ และการชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากกว่าร้อยละ 4 หรือ 50 มิลลิกรัม (เลือกใช้เกณฑ์ที่มีค่าน้อยกว่า) บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_{total}

ข. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

1. นำถ้วยกระเบื้องที่มีผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่ (ก.6) เข้าเตาเผาขณะอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นอุณหภูมิห้อง แล้วตั้งอุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเป็น 550 ± 25 องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 1 ชั่วโมง

2. ปล่อยให้ถ้วยกระเบื้องที่มีผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่มาเผาอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส โดยนำเข้าเตาเผาขณะอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นอุณหภูมิห้อง แล้วตั้งอุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเป็น 550 ± 25 องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 30 นาที ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

ทำซ้ำขั้นตอนการเผา (30 นาที) การปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ และการชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากกว่าร้อยละ 4 หรือ 50 มิลลิกรัม (เลือกใช้เกณฑ์ที่มีค่าน้อยกว่า) บันทึกค่าน้ำหนักเป็น $W_{volatile}$

การคำนวณ

ก. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

$$\% \text{Total solids} = \frac{(W_{total} - W_{dish})}{(W_{sample} - W_{dish})} \times 100$$

โดยที่	W_{total}	=	น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)
	W_{dish}	=	น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)
	W_{sample}	=	น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องก่อนอบ (มิลลิลิตร)

ข. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids)

$$\% \text{Volatile solids} = \frac{(W_{\text{total}} - W_{\text{volatile}})}{(W_{\text{total}} - W_{\text{dish}})} \times 100$$

โดยที่ W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

W_{dish} = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

W_{volatile} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิลิตร)

ค. ของแข็งคงตัว (Fixed solids)

$$\% \text{Fixed solids} = \frac{(W_{\text{volatile}} - W_{\text{dish}})}{(W_{\text{total}} - W_{\text{dish}})} \times 100$$

โดยที่ W_{volatile} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิลิตร)

W_{dish} = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)



2. อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทำโดยการออกซิไดซ์อินทรีย์คาร์บอนด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในกรดเข้มข้น แล้ววิเคราะห์ไดโครเมต ($Cr_2O_7^{2-}$) ที่เหลือ (Walkley and Black method) ตามที่ระบุใน Nelson and Sommers (1996) และคำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้ Oxidation factor ตามที่ระบุใน Fagbenro and Oyeleye (1999)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME3002
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
5. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
6. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
7. ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask)
8. ปีกเกอร์ (Beaker)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98
2. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate solution) 1.0 นอร์แมล
ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) เกรดสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 49.04 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
3. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun indicator solution)
ละลาย 1,10-ฟีแนนโทลีนโมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate, $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) จำนวน 1.485 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Ferrous sulfate heptahydrate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) จำนวน 695 มิลลิกรัม ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

4. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล

ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 196 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป จำนวน 20 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตนี้ต้องทำการเทียบมาตรฐาน (Standardize) กับสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้ง ก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์แมล จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 40 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล
- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จากสูตร

$$N_{\text{FAS}} = \frac{20 \text{ ml} \times 1 \text{ N}}{V_{\text{FAS}} \text{ (ml)}}$$

โดยที่ N_{FAS} = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) (นอร์แมล)

V_{FAS} = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหาร ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร จำนวน 0.1 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1.0 นอร์แมล ลงในขวดชมพู จำนวน 20 มิลลิลิตร แกว่งขวดชมพูเบา ๆ ให้ผลิตภัณฑ์เนื้อชีวภาพบรรจุอาหารผสมกับสารละลาย
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 40 มิลลิลิตร โดยเร็ว ให้กรดผสมกับสารละลายตัวอย่างโดยตรง แกว่งขวดชมพูเบา ๆ ให้สารละลายตัวอย่างผสมเข้ากันดี เป็นเวลา 1 นาที
4. ตั้งขวดชมพูทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ทำปฏิกิริยา
5. เติมน้ำกลั่น จำนวน 100 มิลลิลิตร
6. หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด

7. ไทเทรตสารละลายในขวดชมพู ด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล เมื่อสารละลายใกล้ถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเข้ม ที่จุดนี้ค่อย ๆ เติมสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปช้า ๆ (ทีละหยด) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวอมน้ำเงินเป็นสีน้ำตาลแกมแดง

8. เมื่อพบว่าปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตอยู่ระหว่าง 0 – 8 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่ โดยลดน้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารลง หรือพบว่าปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตเท่ากับหรือมากกว่า 34 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่เช่นกัน โดยเพิ่มน้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารให้มากขึ้น

9. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ 2. – 7.) บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

การคำนวณ

$$\% \text{Organic carbon} = \frac{(T_1 - T_2) \times N_{\text{FAS}} \times 0.003 \times O_f}{W_{\text{solid sample}}} \times 100$$

โดยที่	T_1	= ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)
	T_2	= ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
	N_{FAS}	= ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (นอร์แมล)
	0.003	= น้ำหนักสมมูลของคาร์บอน (กรัม)
	O_f	= Oxidation factor (เท่ากับ 1.4550)
	$W_{\text{solid sample}}$	= น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

3. ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)

การหาปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นมีขั้นตอนการวิเคราะห์ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การย่อย (Digestion) การกลั่น (Distillation) และการไทเทรต (Titration) มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังระบุใน ASTM International (2006)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME3002
3. หลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 300 มิลลิลิตร
4. เตาย่อยเทคโนโลยีอินฟราเรด (Rapid digestion system) แบบ 12 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น TT125
5. เครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ (Automatic steam distillation) ของบริษัท Gerhardt รุ่น VA820
6. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
7. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
8. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
9. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
10. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
11. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
12. ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask)
13. ปีกเกอร์ (Beaker)
14. กระบอกตวง (Cylinder)
15. กระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารผสมเร่งปฏิกิริยา (Catalyst mixture)
ในที่นี้ใช้สารผสมเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า Kjelblet ของ OSKON CO., LTD มีอัตราส่วนระหว่าง $K_2SO_4 : CuSO_4 \cdot 5H_2O$ เท่ากับ 9 : 1
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98

3. สารละลายต่าง (Alkali solution) ร้อยละ 50

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 500 กรัม ในน้ำกลั่น ประมาณ 800 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในบีกเกอร์ (เตรียมในตู้ดูดควัน และวางบีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้จะร้อนมาก) เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติก ที่มีฝาเกลียว

4. สารละลายกรดบอริก (Boric acid) ร้อยละ 5

ละลายกรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3) จำนวน 50 กรัม ลงในน้ำกลั่น ตั้งบนเครื่องให้ความร้อน เปิดความร้อนให้กรดบอริกละลาย ปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียง อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

5. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)

ละลายเมทิลเรด (Methyl red, $C_{15}H_{15}N_3O_2$) จำนวน 0.125 กรัม และเมทิลีนบลู (Methylene blue, $C_{16}H_{18}ClN_3S$) จำนวน 0.083 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในขวดปรับปริมาตร (สารละลายนี้ต้องเตรียมใหม่ทุก ๆ 2 เดือน)

6. สารละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (Methyl red indicator)

ละลายเมทิลเรด (Methyl red, $C_{15}H_{15}N_3O_2$) จำนวน 0.1 กรัม ลงในเอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในขวดปรับ ปริมาตร

7. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (Standard sulfuric acid) 0.1 นอร์แมล

ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 3 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติ ดังนี้

- ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ประมาณ 0.008 – 0.04 กรัม ใส่ลงในขวด ชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50.0 มิลลิลิตร เขย่าจนสารละลายหมด ปิด-เปิดสารละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ จำนวน 300 ไมโครลิตร ลงในขวดชมพู
- นำไปไทเทรตกับสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล จนสารละลายเปลี่ยนจากสี เหลืองเป็นสีแดง
- นำขวดชมพูไปต้มให้สารละลายเดือดเป็นเวลา 2 นาที สีของสารละลายจะเปลี่ยน จากสีแดงเป็นสีเหลือง
- ใช้น้ำหล่อเย็นด้านนอกของขวดชมพู จนสารละลายมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
- ไทเทรตต่อกับสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล จนได้สารละลายสีแดง

- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกจากสูตรต่อไปนี้ โดยใช้ น้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ของโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 53.0 กรัม โซเดียมคาร์บอเนตต่ออควิวาเลนต์ (53 g Na₂CO₃/eq)

$$N_{\text{Sulfuric acid}} = \frac{A \text{ g Na}_2\text{CO}_3}{B \text{ ml H}_2\text{SO}_4} \times \frac{\text{eq}}{53 \text{ g Na}_2\text{CO}_3} \times \frac{1000 \text{ ml}}{L}$$

โดยที่ $N_{\text{Sulfuric acid}}$ = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริก (นอร์แมล)
 A = น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต (กรัม)
 B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

วิธีวิเคราะห์

ก. การย่อย

1. ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ขนาด 0.5 x 0.5 เซนติเมตร จำนวน 1.0 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละชิ้นไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง
2. ใส่สารผสมเร่งปฏิกิริยา (Kjelblet) จำนวน 2 เม็ด (น้ำหนักเม็ดละประมาณ 3.5 กรัม)
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 20 มิลลิลิตร ในตู้ดูดควัน โดยค่อย ๆ เติมกรดให้ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง และแกว่งหลอดแก้วเบา ๆ ให้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารผสมกับกรด
4. วางหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างลงในที่วางหลอดทดลอง (Insert rack) แล้วต่อเข้ากับชุดดูดไอกรด (Waste gas collection hood)
5. วางที่วางหลอดทดลองลงในเตาย่อยเทคโนโลยีอินฟราเรดเพื่อให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใสมีสีเขียวอมฟ้า
6. ปลอยตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
7. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 มิลลิลิตร แกว่งให้สารละลายผสมกันดี
8. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ ก.2. – ก.7.)

ข. การกลั่น

1. เปิดเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติให้พร้อมใช้งานและตั้งค่าเวลาการกลั่น เป็นเวลา 300 วินาที ต่อสายยางของเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติเข้ากับขวดพลาสติกเก็บสารละลายต่าง จากนั้นเปิดน้ำเย็น ผ่านเข้าเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ

2. ปิดเตาสารละลายกรดบอริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร

3. ปิดเตาสารละลายอินดิเคเตอร์ผสม จำนวน 300 ไมโครลิตร ลงในขวดชมพู จากนั้นนำไปวางตรงตำแหน่งที่รองรับก๊าซแอมโมเนียจากการกลั่น โดยให้ปลายสายยางของชุดควบแน่นลุ่มอยู่ใต้สารละลาย

4. นำหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างจากขั้นตอนการย่อย (ก.7.) ต่อเข้ากับเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ จากนั้นกดปุ่มเติมสารละลายต่างอย่างช้า ๆ (NaOH) ประมาณ 50 มิลลิลิตร หรือจนกว่าสารละลายภายในหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างมีสีดํา

5. กดปุ่มเริ่มการทำงานของเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ (Run)

6. นำสารละลายที่กลั่นได้ (Distillate) ปริมาตรประมาณ 100 – 150 มิลลิลิตร ไปทำการไทเทรตในขั้นตอนต่อไป

7. กลั่นชุดควบคุม (Blank) และนำไปไทเทรตเช่นเดียวกับชุดตัวอย่าง

ค. การไทเทรต

ไทเทรตสารละลายในขวดชมพูที่กลั่นได้จากขั้นตอนการกลั่น (ข.6.) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล เมื่อถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีม่วงอ่อน (Pale lavender)

การคำนวณ

$$\% \text{Total Kjeldahl Nitrogen} = \frac{(A - B) \times N \times 0.014}{C} \times 100$$

- โดยที่
- A = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)
 - N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (นอร์แมล)
 - C = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัมของแข็งทั้งหมด)

4. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus)

การหาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดประกอบด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดผสมระหว่าง HNO_3 : H_2SO_4 : HClO_4 อัตราส่วน 3 : 1 : 1 ตามที่ระบุใน Twyman (2005) และการทำให้เกิดสีเพื่อหาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธีวานาโดโมลิบโดฟอสฟอริกแอซิด (Vanadomolybdophosphoric acid method) ตามที่ระบุใน Nelson and Sommers (1996)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME3002
3. หลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 300 มิลลิลิตร
4. เตาย่อยเทคโนโลยีอินฟราเรด (Rapid digestion system) แบบ 12 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น TT125
5. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
6. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
7. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
8. ชุดกรองบูชเนอร์ (Buchner filtration apparatus)
9. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
10. กระจกทรง (Cylinder)
11. ขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask)
12. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
13. กระจกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. กรดไนตริกเข้มข้น (Nitric acid, HNO_3) ร้อยละ 65
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98
3. กรดเพอร์คลอริกเข้มข้น (Perchloric acid, HClO_4) ร้อยละ 70 – 72

4. สารละลายแอมโมเนียมโพลิบเดต (สารละลาย A)
ละลายแอมโมเนียมโพลิบเดตเตตระไฮเดรต (Ammonium molybdate tetrahydrate, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 25 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 400 มิลลิลิตร
5. สารละลายแอมโมเนียมวานาเดต (สารละลาย B)
ละลายแอมโมเนียมวานาเดต (Ammonium vanadate, NH_4VO_3) จำนวน 1.25 กรัม ในน้ำร้อนประมาณ 300 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
6. สารละลายรวม (Mixed reagent)
ถ่ายสารละลาย B (ข้อ 5.) ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 จำนวน 250 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ และแกว่งให้สารละลายผสมกัน ปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง จากนั้นถ่ายสารละลาย A (ข้อ 4.) ลงไป และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร (มีอายุการใช้งาน 4 ชั่วโมง)
7. สารละลายกรดเพอร์คลอริก 2 นอร์แมล
ปิเปตกรดเพอร์คลอริกเข้มข้นร้อยละ 70 – 72 จำนวน 170 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร
8. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (Standard phosphorus) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
ละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4) จำนวน 0.2197 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

ก. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 0 2 4 6 8 และ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายรวม (Mixed reagent) จำนวน 10 มิลลิลิตร และเติมสารละลายกรดเพอร์คลอริก 2 นอร์แมล จำนวน 4 มิลลิลิตร (หรือเติมเท่ากับปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (Aliquot used)) ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ตั้งไว้เพื่อให้เกิดสีอย่างน้อย 20 นาที ชุดสารละลายมาตรฐานจะมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
2. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

ข. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. การย่อย

1.1 ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร จำนวน 1.0 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง

1.2 เติมนครดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 จำนวน 15 มิลลิลิตร โดยให้นครดไนตริกเข้มข้นค่อย ๆ ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่างและชะล้างตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารที่ติดอยู่บริเวณคอขวดให้ไหลลงไปในหลอดแก้ว

1.3 วางหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างลงในที่วางหลอดทดลอง (Insert rack) และต่อเข้ากับชุดดูดไอกรด (Waste gas collection hood)

1.4 วางที่วางหลอดทดลองลงในเตาย่อยเทคโนโลยีอินฟาเรดเพื่อให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งขณะต้มย่อยตัวอย่างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น จะสังเกตเห็นควันสีเหลืองส้มเกิดขึ้นค่อนข้างหนาแน่นในช่วงแรก ย่อยต่อไปจนควันสีเหลืองจางลง และปริมาตรสารละลายตัวอย่างลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.5 หยุดการต้มย่อย ปลดตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

1.6 เติมนครดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 5 มิลลิลิตร และเติมนครดเพอร์คลอริกเข้มข้นร้อยละ 70 – 72 จำนวน 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ

1.7 แก้วหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่างเบา ๆ ให้สารละลายผสมเข้ากันดี

1.8 ต้มย่อยต่อโดยใช้ความร้อนที่สูงขึ้น ในช่วงแรกของการต้มย่อยในขั้นตอนนี้ จะสังเกตเห็นควันสีเหลืองส้ม ต่อมาควันจะมีลักษณะเป็นสีขาว ต้มย่อยต่อจนได้สารละลายใสและมีปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.9 หยุดการต้มย่อย ปลดตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

1.10 เติมน้ำกลั่น ประมาณ 30 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวง โดยเติมให้ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่าง แล้วต้มย่อยต่อด้วยความร้อนต่ำลง จนสังเกตเห็นควันขาวหนาที่บ และปริมาตรของสารละลายลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.11 เติมน้ำกลั่น ประมาณ 15 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวง โดยเติมให้ไหลลงตามคอหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่าง และแก้วหลอดแก้วสำหรับย่อยตัวอย่างเบา ๆ ให้สารละลายผสมเข้ากันดี

1.12 กรองสารละลายตัวอย่างด้วยชุดกรองบุชเนอร์ โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ถ่ายน้ำกรองลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. การทำให้เกิดสีและการวัดค่าการดูดกลืนแสง

2.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 4 มิลลิลิตร หรือจำนวนอื่น ๆ (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายตัวอย่าง)

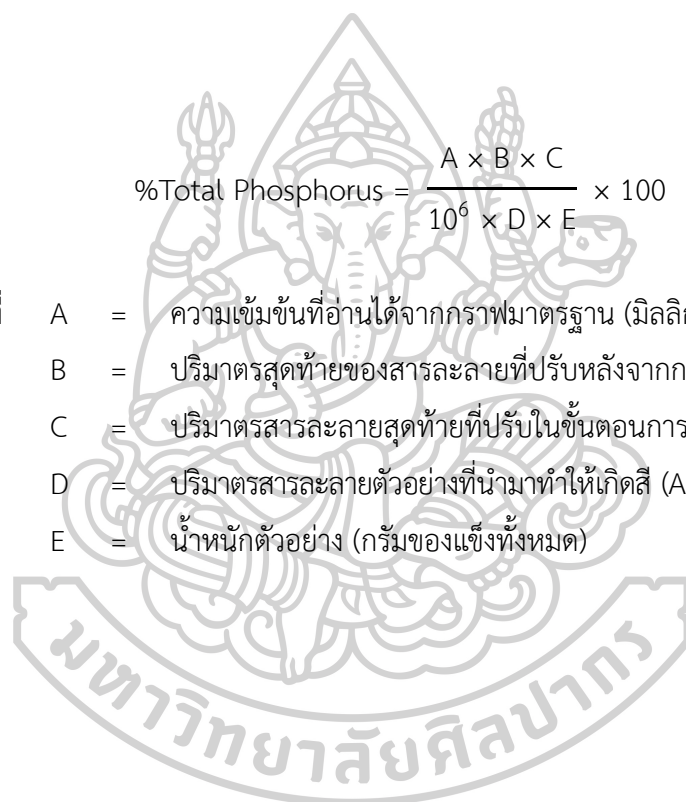
2.2 เติมสารละลายรวม (Mixed reagent) จำนวน 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้สารละลายผสมเข้ากันดีและตั้งไว้ให้เกิดสีอย่างน้อย 20 นาที

2.3 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

การคำนวณ

$$\% \text{Total Phosphorus} = \frac{A \times B \times C}{10^6 \times D \times E} \times 100$$

- โดยที่
- A = ความเข้มข้นที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 - B = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายที่ปรับหลังจากการย่อย (มิลลิลิตร)
 - C = ปริมาตรสารละลายสุดท้ายที่ปรับในขั้นตอนการทำให้เกิดสี (มิลลิลิตร)
 - D = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่นำมาทำให้เกิดสี (Aliquot used) (มิลลิลิตร)
 - E = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัมของแข็งทั้งหมด)



5. ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในที่นี้เป็น การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของแข็ง (Solid substrate) โดยใช้วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux method) ตามที่ระบุใน Raposo et al. (2008)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME3002
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
5. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
6. เตาให้ความร้อน (Multi heating mantles) แบบหลุม 6 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น KI 26
7. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
8. ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
9. ชุดกลั่นแบบไหลกลับ (Reflux distillation)
10. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
11. ปีกเกอร์ (Beaker)
12. เม็ดแก้ว (Glass beads)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) ร้อยละ 98
2. สารละลายสำหรับการย่อยสลาย (Digestion reagent)

ละลายเมอคิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate, $HgSO_4$) จำนวน 33.3 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 600 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป 167 มิลลิลิตร หลังจากนั้นละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) เกรดสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 58.844 กรัม แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

3. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid reagent)

ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate, AgSO_4) จำนวน 10 กรัม ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 1000 มิลลิลิตร

4. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate solution) 1.0 นอร์แมล

ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 49.13 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป 167 มิลลิลิตร แกว่งผสมให้โพแทสเซียมไดโครเมตละลายจนหมด ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

5. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroin indicator solution)

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทลีนโมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 1.485 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Ferrous sulfate heptahydrate, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 695 มิลลิกรัม ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

6. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล

ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 196.11 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป จำนวน 40 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตนี้ต้องทำการเทียบมาตรฐาน (Standardize) กับสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้ง ก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์แมล จำนวน 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไป 60 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 30 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล
- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จากสูตร

$$N_{\text{FAS}} = \frac{10 \text{ ml} \times 1 \text{ N}}{V_{\text{FAS}}}$$

โดยที่ N_{FAS} = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) (นอร์แมล)

V_{FAS} = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

7. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP) 0.0416 นอร์แมล

ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, $KHC_8H_4O_4$) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 8.50 กรัม ในน้ำกลั่น ประมาณ 500 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายนี้มีค่าซีไอดีตามทฤษฎีเท่ากับ 10,000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร และมีอายุการใช้งาน 1 สัปดาห์ หากเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร จำนวน 0.1 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้วลงไป 4 – 5 เม็ด

2. ปิเปิดน้ำกลั่น จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม

3. ปิเปิดสารละลายสำหรับการย่อยสลาย จำนวน 20 มิลลิลิตร และค่อย ๆ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก จำนวน 30 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ แกว่งขวดก้นกลมให้สารละลายผสมกันดี

4. ต่อขวดก้นกลมเข้ากับชุดกลั่นแบบไหลกลับ และวางขวดก้นกลมบนเตาให้ความร้อน พร้อมเปิดน้ำเย็นเข้าชุดกลั่นแบบไหลกลับ

5. ปิดปลายด้านบนของเครื่องควบแน่น (Condenser) ด้วยปีกเกอร์ขนาดเล็ก เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งอื่นใดตกลงไปผสมกับสารละลายในขวดก้นกลม จากนั้นทำการต้มตัวอย่างในขวดก้นกลมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

6. ฉีดล้างส่วนที่ค้างอยู่ในเครื่องควบแน่นด้วยน้ำกลั่น ลงไปในขวดก้นกลม (ฉีดล้างจำนวน 3 รอบ) และนำขวดก้นกลมออกจากเตาให้ความร้อน

7. เติมน้ำกลั่นเพิ่มประมาณ 90 มิลลิลิตร ลงไปในขวดก้นกลม หยดเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตสารละลายในขวดก้นกลมกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์แมล เมื่อใกล้ถึงจุดยุติ สารละลายในขวดก้นกลมจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวเข้ม ที่จุดนี้ค่อย ๆ เติมสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปช้า ๆ (ทีละหยด) จนกระทั่งสารละลายในขวดก้นกลม

เปลี่ยนจากสีเขียวอมน้ำเงินเป็นสีน้ำตาลแกมแดง บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

8. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหาร (ข้อ 2. – 7.) บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

การตรวจสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีวิเคราะห์

การตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ปฏิบัติโดยการใช้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนทาเลต (KHP) ความเข้มข้น 0.0416 นอร์แมล ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดก้นกลม และปฏิบัติตามวิธีวิเคราะห์ข้อ 2. – 7. และประเมินความเที่ยงและความแม่นยำของค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้เทียบกับค่าตามทฤษฎี

การคำนวณ

$$\text{COD (mg O}_2\text{ g}^{-1}\text{VS)} = \frac{(\text{FAS}_{\text{blank}} - \text{FAS}_{\text{solid sample}}) \times \text{N}_{\text{FAS}} \times 8}{\text{W}_{\text{solid sample}}}$$

โดยที่ COD = ปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand) (มิลลิกรัม ออกซิเจนต่อกรัมของแข็งระเหย)

$\text{FAS}_{\text{blank}}$ = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)

$\text{FAS}_{\text{solid sample}}$ = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับชุดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N_{FAS} = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (นอร์แมล)



ภาคผนวก ง

รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหาร

1. สารแทรก (Extractives)

การกำจัดสารแทรก ทำโดยการสกัดสารแทรกออกจากเศษอาหารด้วยอะซีโตน (Acetone) โดยใช้ชุดซอกซ์ເລตสำหรับการสกัดและคำนวณหาปริมาณสารแทรกที่หายไปหลังจากการสกัด ตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุใน Ayeni et al. (2013)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME3002
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
5. เตาให้ความร้อน (Multi heating mantles) แบบหลุม 6 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น KI 26
6. เครื่องควบแน่น (Condenser) และระบบทำความเย็น (Cooling system)
7. ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
8. ซอกซ์ເລต (Glass soxhlet extraction tubes)
9. หลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Extraction thimbles for soxhlet extraction)
10. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของบริษัท WEIFO รุ่น DRY-60
11. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 250 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. อะซีโตน (Acetone)
อะซีโตน (Acetone, C_3H_6O) เกรดงานวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9

วิธีวิเคราะห์

1. นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Thimble) ใส่ลงปีกเกอร์
2. อบหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดและปีกเกอร์ ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ซึ่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดและปีกเกอร์ บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_T

3. ชั่งตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้ง (ภาคผนวก ก) จำนวน 5.0 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่วางอยู่ในบีกเกอร์
4. อบหลอดกระดาษกรองที่มีเศษอาหารแบบแห้งบรรจุอยู่พร้อมกับบีกเกอร์ ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ จากนั้นชั่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีเศษอาหารแบบแห้งบรรจุอยู่พร้อมกับบีกเกอร์ บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_S
5. นำหลอดกระดาษกรองที่มีเศษอาหารแบบแห้งบรรจุอยู่ในซอกท์เลต (Soxhlet) แล้วนำไปต่อกับเครื่องควบแน่น (Condenser)
6. เปิดน้ำเย็นผ่านเข้าชุดกลั่นแบบไหลกลับ
7. เติมอะซีโตน จำนวน 300 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
8. ต่อบนขวดก้นกลมเข้ากับซอกท์เลตและวางขวดก้นกลมบนเตาให้ความร้อน เปิดเตาให้ความร้อนโดยควบคุมให้มีระยะเวลาของการไหลย้อนกลับของอะซีโตนประมาณ 6 – 10 รอบต่อชั่วโมง
9. ทำการสกัดเป็นระยะเวลานาน 8 ชั่วโมง
10. ปิดเตาให้ความร้อน นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่มีเศษอาหารแบบแห้งบรรจุอยู่ออกจากซอกท์เลตใส่ลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ
11. นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่มีเศษอาหารแบบแห้งบรรจุอยู่และบีกเกอร์ไปอบที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีเศษอาหารแบบแห้งบรรจุอยู่พร้อมกับบีกเกอร์ บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_E
12. นำตัวอย่างเก็บลงในถุงซิปล็อก เพื่อรอการวิเคราะห์เฮมิเซลลูโลส และลิกนินต่อไป

การคำนวณ

$$\% \text{Extractives (\%EXT)} = \frac{(W_S - W_T) - (W_E - W_T)}{(W_S - W_T)} \times 100$$

- โดยที่
- W_S = น้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่และบีกเกอร์ หลังอบ (กรัม)
 - W_T = น้ำหนักหลอดกระดาษกรองและบีกเกอร์หลังอบ (กรัม)
 - W_E = น้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่และบีกเกอร์ หลังการสกัด (กรัม)

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

การวิเคราะห์เฮมิเซลลูโลส ทำโดยต้มย่อยตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และคำนวณปริมาณเฮมิเซลลูโลสจากน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปหลังจากการต้มย่อยตัวอย่าง ตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุใน Ayeni et al. (2013)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
4. ชุดกรอง (Filtration setup) ประกอบด้วย
 - ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
 - ขวดลดความดัน (Suction flask)
 - แผ่นยางรองครุชีเบลแก้ว (Rubber filter adapter for fritted glass crucible)
5. ครุชีเบลแก้ว (Fritted glass crucible) ของ PYREX ขนาด 30 มิลลิลิตร
6. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของ WEIFO รุ่น DRY-60
7. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
8. กระบอกตวง (Cylinder)
9. ปีกเกอร์ (Beaker)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) 0.5 นอร์แมล
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกที่มีฝาเกลียว

วิธีวิเคราะห์

1. อบครุชีเบลแก้วที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_c

2. ชั่งตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free biomass) (วิธีเตรียมดูได้จากวิธีวิเคราะห์สารแทรก) จำนวน 0.2 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_S
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ จำนวน 150 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู
4. ต้มสารละลายตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที
5. หลังจากต้มตัวอย่าง กรองตัวอย่างทันทีผ่านครุชชีเบลแก้วที่ผ่านการอบและทราบน้ำหนัก (W_C) ลงในขวดลดความดัน จากนั้นล้างตัวอย่างในครุชชีเบลแก้วด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิสูงหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งน้ำกรองมีค่าพีเอชเป็นกลาง
6. อบตัวอย่างและครุชชีเบลแก้ว ในตู้อบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_H

การคำนวณ

1. ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free hemicellulose)

$$\% \text{Hemicellulose}_{\text{EXT free}} (\% \text{HEM}_{\text{EXT free}}) = \frac{W_S - (W_H - W_C)}{W_S} \times 100$$

โดยที่

- W_S = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)
- W_H = น้ำหนักตัวอย่างและครุชชีเบลแก้วหลังอบ (กรัม)
- W_C = น้ำหนักครุชชีเบลแก้วหลังอบ (กรัม)

2. ปริมาณเฮมิเซลลูโลสทั้งหมด (Total Hemicellulose)

$$\% \text{Hemicellulose}_{\text{Total}} (\% \text{HEM}_{\text{Total}}) = (\% \text{HEM}_{\text{EXT free}}) \times \left(\frac{100 - \% \text{EXT}}{100} \right)$$

3. ลิกนิน (Lignin)

การวิเคราะห์ลิกนินทำโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก และคำนวณปริมาณลิกนินทั้งหมดจากปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรด และปริมาณลิกนินที่ละลายในกรด ตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุใน Ayeni et al. (2013) และ Sluiter et al. (2008)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
3. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
4. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดัน (Autoclave) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
5. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)
6. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
7. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
8. ชุดกรอง (Filtration setup) ประกอบด้วย
 - ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
 - ขวดลดความดัน (Suction flask)
 - แผ่นยางรองครุชีเบลแก้ว (Rubber filter adapter for fritted glass crucible)
9. ครุชีเบลแก้ว (Fritted glass crucible)
10. ขวดซีรัม (Serum bottle) ขนาด 100 มิลลิลิตร
11. จุกยาง (Rubber stopper) สำหรับปิดขวดซีรัม
12. ฝาอะลูมิเนียม (Aluminum crimp cap) สำหรับปิดขวดซีรัม
13. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของบริษัท WEIFO รุ่น DRY-60
14. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 10 มิลลิลิตร
15. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
16. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid solution) ความเข้มข้นร้อยละ 72 (ความถ่วงจำเพาะ 1.634)
เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Concentrated sulfuric acid, concentrated H_2SO_4) ร้อยละ 98 (ความถ่วงจำเพาะ 1.84) จำนวน 652 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
2. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)
ละลายแบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride, $BaCl_2$) จำนวน 10 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

1. เผาครุชีเบิลแก้วในเตาเผา ที่ระดับอุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง นำครุชีเบิลแก้วออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_c
2. ชั่งตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free biomass) (วิธีเตรียมได้จากวิธีวิเคราะห์สารแทรก) จำนวน 0.3 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น ร้อยละ 72 จำนวน 3 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ กวนผสมตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งและสารละลายกรดซัลฟิวริกให้เข้ากันดีด้วยแท่งแก้วคนสาร
4. ตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง และบ่มตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งในบีกเกอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยกวนผสมตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งและสารละลายกรดซัลฟิวริกในบีกเกอร์ด้วยแท่งแก้วคนสารทุก ๆ 10 – 15 นาที ตลอดระยะเวลาการบ่ม เพื่อให้กระบวนการไฮโดรไลซิสขั้นต้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์
5. เมื่อครบระยะเวลาการบ่ม 2 ชั่วโมง ค่อย ๆ ถ่ายสารละลายตัวอย่างจากบีกเกอร์ลงในขวดซีรัม โดยการล้างด้วยน้ำกลั่น จำนวน 84 มิลลิลิตร (โดยใช้ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้)
6. ปิดปากขวดซีรัมด้วยจุกยาง (Rubber stopper) และรัดให้แน่นด้วยฝาอะลูมิเนียม (Aluminum crimp cap) แกว่งขวดซีรัมเพื่อให้ตัวอย่างเศษอาหารแบบแห้งในขวดซีรัมสัมผัสกับสารละลายกรดซัลฟิวริกอย่างทั่วถึง

7. นำขวดซีรัมวางลงในตะแกรงสเตนเลส และนำไปทำให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสชั้นที่สองด้วยวิธีหนึ่งด้วยไอน้ำ ที่ระดับอุณหภูมิ 121 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ผสมในขวดซีรัมให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

8. กรองของผสมในขวดซีรัมผ่านครุชชีเบลแก้วที่ผ่านการเผาและทราบน้ำหนัก (W_C) ลงในขวดลดความดัน

9. ถ่ายน้ำกรองจากขวดลดความดัน ประมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดพลาสติก เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณลิกนินที่ละลายในกรด (Acid soluble lignin) ต่อไป ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ภายใน 6 ชั่วโมง หลังจากสิ้นสุดกระบวนการไฮโดรไลซิสชั้นที่สอง โดยปฏิบัติตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุในข้อที่ 15.

10. เมื่อเก็บน้ำกรองลงในขวดพลาสติกเรียบร้อยแล้ว ให้ใช้กระบอกฉีดน้ำกลั่นซึ่งบรรจุน้ำกลั่นอุณหภูมิสูง ฉีดล้างตัวอย่างที่ติดค้างอยู่ภายในขวดซีรัมลงในครุชชีเบลแก้วให้หมด จากนั้นล้างตัวอย่างในครุชชีเบลแก้วด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิสูงหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งตรวจไม่พบซัลเฟตไอออนในน้ำกรอง (โดยการทดสอบด้วยสารละลายแบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride, $BaCl_2$) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)) หรือจนกระทั่งน้ำกรองมีพีเอชเป็นกลาง

11. อบตัวอย่างและครุชชีเบลแก้ว ในตู้อบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_L

12. เผาครุชชีเบลแก้วและตัวอย่างในเตาเผา ที่ระดับอุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

13. นำตัวอย่างและครุชชีเบลแก้วออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_A

14. คำนวณปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรด (Acid insoluble lignin) โดยใช้ค่าน้ำหนัก W_C , W_L และ W_A

15. การวิเคราะห์หาปริมาณลิกนินที่ละลายในกรดด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) มีรายละเอียดดังนี้

15.1 กำหนดความยาวคลื่นบนเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ให้มีความยาวคลื่น เท่ากับ 205 นาโนเมตร ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกรองที่เก็บอยู่ในขวดพลาสติกในข้อ 9. ด้วยเซลล์ที่ทำจากควอตซ์ (Quartz) ซึ่งมีความยาวให้ลำแสงผ่านเท่ากับ 1 เซนติเมตร และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 4 เป็นสารละลายที่ไม่มีสารดูดกลืนแสงหรือเป็นสารละลายอ้างอิง (Blank or reference solution)

15.2 หากค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกรองตัวอย่างมีค่าสูงกว่า 0.7 ให้เจือจางน้ำกรองตัวอย่างในขวดปริมาตรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จนสามารถอ่านค่าการดูดกลืนแสงได้อยู่ในช่วง 0.2 – 0.7

15.3 คำนวณปริมาณลิกนินที่ละลายในกรดโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 205 นาโนเมตร ค่าการเจือจาง (Dilution factor, DF) และค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง (Absorptivity constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 110 ลิตรต่อกรัม-เซนติเมตร

การคำนวณ

1. ปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรดทั้งหมด (Acid insoluble lignin, AISL)

$$\%AISL = \left(\frac{(W_L - W_C) - (W_A - W_C)}{W_S} \times 100 \right) \times \left(\frac{100 - \%EXT}{100} \right)$$

โดยที่ W_L = น้ำหนักตัวอย่างและครุชีเบิลแก้วหลังอบ (มิลลิกรัม)
 W_C = น้ำหนักครุชีเบิลแก้วหลังเผา (มิลลิกรัม)
 W_A = น้ำหนักตัวอย่างและครุชีเบิลแก้วหลังเผา (มิลลิกรัม)
 W_S = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (มิลลิกรัม)

2. ปริมาณลิกนินที่ละลายในกรดทั้งหมด (Acid soluble lignin, ASL)

$$\%ASL = \left(\frac{\text{Absorbance} \times DF \times V}{W_S \times \text{Path length} \times 110} \times 100 \right) \times \left(\frac{100 - \%EXT}{100} \right)$$

โดยที่ Absorbance = ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกรองตัวอย่าง
 DF = ค่าการเจือจางน้ำกรองตัวอย่าง
 V = ปริมาตรทั้งหมดของน้ำกรองตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 W_S = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (มิลลิกรัม)
 Path length = ความยาวของเซลล์ที่ลำแสงผ่าน (เซนติเมตร)
 110 = ค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง (ลิตรต่อกรัม-เซนติเมตร)

3. ปริมาณลิกนินทั้งหมด (Total lignin)

$$\%Lignin_{Total} (\%LIG_{Total}) = \%AISL + \%ASL$$

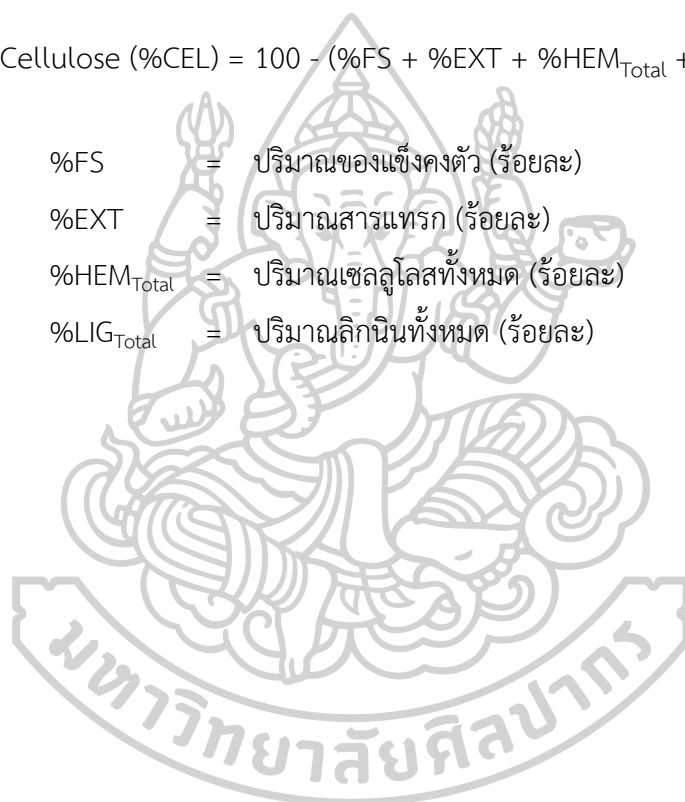
4. เซลลูโลส (Cellulose)

การหาปริมาณเซลลูโลสทำได้โดยการคำนวณจากปริมาณสารแทรก เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า โดยมีสมมติฐานว่า องค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีเพียงสารแทรก เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เถ้า และเซลลูโลส เท่านั้น ตามการคำนวณที่ระบุใน Ayeni et al. (2013)

การคำนวณ

$$\%Cellulose (\%CEL) = 100 - (\%FS + \%EXT + \%HEM_{Total} + \%LIG_{Total})$$

โดยที่	%FS	=	ปริมาณของแข็งคงตัว (ร้อยละ)
	%EXT	=	ปริมาณสารแทรก (ร้อยละ)
	%HEM _{Total}	=	ปริมาณเซลลูโลสทั้งหมด (ร้อยละ)
	%LIG _{Total}	=	ปริมาณลิกนินทั้งหมด (ร้อยละ)





ภาคผนวก จ

รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ
ของผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

1. สารแทรก (Extractives)

การกำจัดสารแทรก ทำโดยการสกัดสารแทรกออกจากผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ด้วยอะซีโตน (Acetone) โดยใช้ชุดซอกท์เลตสำหรับการสกัดและคำนวณหาปริมาณสารแทรกที่หายไป หลังจากการสกัด ตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุใน Ayeni et al. (2013)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME204
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น ME3002
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
5. เตาให้ความร้อน (Multi heating mantles) แบบหลุม 6 หลุม ของบริษัท Gerhardt รุ่น KI 26
6. เครื่องควบแน่น (Condenser) และระบบทำความเย็น (Cooling system)
7. ขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
8. ซอกท์เลต (Glass soxhlet extraction tubes)
9. หลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Extraction thimbles for soxhlet extraction)
10. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของบริษัท WEIFO รุ่น DRY-60
11. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 250 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. อะซีโตน (Acetone)
อะซีโตน (Acetone, C_3H_6O) เกรดงานวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9

วิธีวิเคราะห์

1. นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Thimble) ใส่ลงปีกเกอร์
2. ออบหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดและปีกเกอร์ ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ซึ่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดและปีกเกอร์ บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_T

3. ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร จำนวน 5.0 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละชิ้นไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่วางอยู่ในบีกเกอร์
4. ออบหลอดกระดาษกรองที่มีผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่พร้อมกับบีกเกอร์ ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ จากนั้นชั่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่พร้อมกับบีกเกอร์ บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_S
5. นำหลอดกระดาษกรองที่มีผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่ในซอกท์เลต (Soxhlet) แล้วนำไปต่อกับเครื่องควบแน่น (Condenser)
6. เปิดน้ำเย็นผ่านเข้าชุดกลั่นแบบไหลกลับ
7. เติมอะซีโตน จำนวน 300 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
8. ต่อขวดก้นกลมเข้ากับซอกท์เลตและวางขวดก้นกลมบนเตาให้ความร้อน เปิดเตาให้ความร้อนโดยควบคุมให้มีระยะเวลาของการไหลย้อนกลับของอะซีโตนประมาณ 6 – 10 รอบต่อชั่วโมง
9. ทำการสกัดเป็นระยะเวลานาน 8 ชั่วโมง
10. ปิดเตาให้ความร้อน นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่มีผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่ออกจากซอกท์เลตใส่ลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นตัวอย่างแห้ง
11. นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่มีผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่และบีกเกอร์ไปอบที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารบรรจุอยู่พร้อมกับบีกเกอร์ บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_E
12. นำตัวอย่างเก็บลงในถุงซิปล็อก เพื่อรอการวิเคราะห์เอมิเซลลูโลส และลิกนินต่อไป

การคำนวณ

$$\% \text{Extractives (\%EXT)} = \frac{(W_S - W_T) - (W_E - W_T)}{(W_S - W_T)} \times 100$$

- โดยที่
- W_S = น้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่และบีกเกอร์ หลังอบ (กรัม)
 - W_T = น้ำหนักหลอดกระดาษกรองและบีกเกอร์หลังอบ (กรัม)
 - W_E = น้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่และบีกเกอร์ หลังการสกัด (กรัม)

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

การวิเคราะห์เฮมิเซลลูโลส ทำโดยต้มย่อยตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และคำนวณปริมาณเฮมิเซลลูโลสจากน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปหลังจากการต้มย่อยตัวอย่าง ตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุใน Ayeni et al. (2013)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
4. ชุดกรอง (Filtration setup) ประกอบด้วย
 - ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
 - ขวดลดความดัน (Suction flask)
 - แผ่นยางรองครุชีเบลแก้ว (Rubber filter adapter for fritted glass crucible)
5. ครุชีเบลแก้ว (Fritted glass crucible) ของ PYREX ขนาด 30 มิลลิลิตร
6. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของ WEIFO รุ่น DRY-60
7. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
8. กระบอกตวง (Cylinder)
9. ปีกเกอร์ (Beaker)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) 0.5 นอร์แมล
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกที่มีฝาเกลียว

วิธีวิเคราะห์

1. อบครุชีเบลแก้วที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_c

2. ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารอบแห้ง ขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร ที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free biomass) (วิธีเตรียมดูได้จากวิธีวิเคราะห์สารแทรก) จำนวน 1.0 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_S
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ จำนวน 150 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู
4. ต้มสารละลายตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที
5. หลังจากต้มตัวอย่าง กรองตัวอย่างที่ผ่านครู่ซีเบลแก้วที่ผ่านการอบและทราบน้ำหนัก (W_C) ลงในขวดลดความดัน จากนั้นล้างตัวอย่างในครู่ซีเบลแก้วด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิสูงหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งน้ำกรองมีค่าพีเอชเป็นกลาง
6. อบตัวอย่างและครู่ซีเบลแก้ว ในตู้อบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_H

การคำนวณ

3. ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free hemicellulose)

$$\% \text{Hemicellulose}_{\text{EXT free}} (\% \text{HEM}_{\text{EXT free}}) = \frac{W_S - (W_H - W_C)}{W_S} \times 100$$

โดยที่

$$W_S = \text{น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)}$$

$$W_H = \text{น้ำหนักตัวอย่างและครู่ซีเบลแก้วหลังอบ (กรัม)}$$

$$W_C = \text{น้ำหนักครู่ซีเบลแก้วหลังอบ (กรัม)}$$

4. ปริมาณเฮมิเซลลูโลสทั้งหมด (Total Hemicellulose)

$$\% \text{Hemicellulose}_{\text{Total}} (\% \text{HEM}_{\text{Total}}) = (\% \text{HEM}_{\text{EXT free}}) \times \left(\frac{100 - \% \text{EXT}}{100} \right)$$

3. ลิกนิน (Lignin)

การวิเคราะห์ลิกนินทำโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก และคำนวณปริมาณลิกนินทั้งหมดจากปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรด และปริมาณลิกนินที่ละลายในกรด ตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุใน Ayeni et al. (2013) และ Sluiter et al. (2008)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
3. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
4. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดัน (Autoclave) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
5. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)
6. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
7. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
8. ชุดกรอง (Filtration setup) ประกอบด้วย
 - ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
 - ขวดลดความดัน (Suction flask)
 - แผ่นยางรองครุชชีเบลแก้ว (Rubber filter adapter for fritted glass crucible)
9. ครุชชีเบลแก้ว (Fritted glass crucible)
10. ขวดซีรัม (Serum bottle) ขนาด 100 มิลลิลิตร
11. จุกยาง (Rubber stopper) สำหรับปิดขวดซีรัม
12. ฝาอะลูมิเนียม (Aluminum crimp cap) สำหรับปิดขวดซีรัม
13. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของบริษัท WEIFO รุ่น DRY-60
14. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 10 มิลลิลิตร
15. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
16. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid solution) ความเข้มข้นร้อยละ 72 (ความถ่วงจำเพาะ 1.634)
เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Concentrated sulfuric acid, concentrated H_2SO_4) ร้อยละ 98 (ความถ่วงจำเพาะ 1.84) จำนวน 652 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
2. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)
ละลายแบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride, $BaCl_2$) จำนวน 10 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

1. เผาครุซีเบลแก้วในเตาเผา ที่ระดับอุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง นำครุซีเบลแก้วออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_c
2. ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารอบแห้งที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free biomass) (วิธีเตรียมได้จากวิธีวิเคราะห์สารแทรก) จำนวน 0.3 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น ร้อยละ 72 จำนวน 3 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ กวนผสมตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารและสารละลายกรดซัลฟิวริกให้เข้ากันดี ด้วยแท่งแก้วคนสาร
4. ตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง และบ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารในบีกเกอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยกวนผสมตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารและสารละลายกรดซัลฟิวริกในบีกเกอร์ด้วยแท่งแก้วคนสารทุก ๆ 10 – 15 นาที ตลอดระยะเวลาการบ่ม เพื่อให้กระบวนการไฮโดรไลซิสขั้นต้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์
5. เมื่อครบระยะเวลาการบ่ม 2 ชั่วโมง ค่อย ๆ ถ่ายสารละลายตัวอย่างจากบีกเกอร์ลงในขวดซีรัม โดยการล้างด้วยน้ำกลั่น จำนวน 84 มิลลิลิตร (โดยใช้ปิเปตดูด-ถ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้)
6. ปิดปากขวดซีรัมด้วยจุกยาง (Rubber stopper) และรัดให้แน่นด้วยฝาอะลูมิเนียม (Aluminum crimp cap) แก้วขวดซีรัมเพื่อให้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารในขวดซีรัมสัมผัสกับสารละลายกรดซัลฟิวริกอย่างทั่วถึง

7. นำขวดซีรัมวางลงในตะแกรงสเตนเลส และนำไปทำให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสชั้นที่สองด้วยวิธีหนึ่งด้วยไอน้ำ ที่ระดับอุณหภูมิ 121 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ผสมในขวดซีรัมให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

8. กรองของผสมในขวดซีรัมผ่านครุชชีเบลแก้วที่ผ่านการเผาและทราบน้ำหนัก (W_C) ลงในขวดลดความดัน

9. ถ่ายน้ำกรองจากขวดลดความดัน ประมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดพลาสติก เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณลิกนินที่ละลายในกรด (Acid soluble lignin) ต่อไป ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ภายใน 6 ชั่วโมง หลังจากสิ้นสุดกระบวนการไฮโดรไลซิสชั้นที่สอง โดยปฏิบัติตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุในข้อที่ 15.

10. เมื่อเก็บน้ำกรองลงในขวดพลาสติกเรียบร้อยแล้ว ให้ใช้กระบอกฉีดน้ำกลั่นซึ่งบรรจุน้ำกลั่นอุณหภูมิสูง ฉีดล้างตัวอย่างที่ติดค้างอยู่ภายในขวดซีรัมลงในครุชชีเบลแก้วให้หมด จากนั้นล้างตัวอย่างในครุชชีเบลแก้วด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิสูงหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งตรวจไม่พบซัลเฟตไอออนในน้ำกรอง (โดยการทดสอบด้วยสารละลายแบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride, $BaCl_2$) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)) หรือจนกระทั่งน้ำกรองมีพีเอชเป็นกลาง

11. อบตัวอย่างและครุชชีเบลแก้ว ในตู้อบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_L

12. เผาครุชชีเบลแก้วและตัวอย่างในเตาเผา ที่ระดับอุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

13. นำตัวอย่างและครุชชีเบลแก้วออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_A

14. คำนวณปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรด (Acid insoluble lignin) โดยใช้ค่าน้ำหนัก W_C , W_L และ W_A

15. การวิเคราะห์หาปริมาณลิกนินที่ละลายในกรดด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) มีรายละเอียดดังนี้

15.1 กำหนดความยาวคลื่นบนเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ให้มีความยาวคลื่น เท่ากับ 205 นาโนเมตร ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกรองที่เก็บอยู่ในขวดพลาสติกในข้อ 9. ด้วยเซลล์ที่ทำจากควอตซ์ (Quartz) ซึ่งมีความยาวให้ลำแสงผ่านเท่ากับ 1 เซนติเมตร และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 4 เป็นสารละลายที่ไม่มีสารดูดกลืนแสงหรือเป็นสารละลายอ้างอิง (Blank or reference solution)

15.2 หากค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกรองตัวอย่างมีค่าสูงกว่า 0.7 ให้เจือจางน้ำกรองตัวอย่างในขวดปริมาตรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จนสามารถอ่านค่าการดูดกลืนแสงได้อยู่ในช่วง 0.2 – 0.7

15.3 คำนวณปริมาณลิกนินที่ละลายในกรดโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 205 นาโนเมตร ค่าการเจือจาง (Dilution factor, DF) และค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง (Absorptivity constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 110 ลิตรต่อกรัม-เซนติเมตร

การคำนวณ

4. ปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรดทั้งหมด (Acid insoluble lignin, AISL)

$$\%AISL = \left(\frac{(W_L - W_C) - (W_A - W_C)}{W_S} \times 100 \right) \times \left(\frac{100 - \%EXT}{100} \right)$$

โดยที่ W_L = น้ำหนักตัวอย่างและครุชชีเบลแก้วหลังอบ (มิลลิกรัม)
 W_C = น้ำหนักครุชชีเบลแก้วหลังเผา (มิลลิกรัม)
 W_A = น้ำหนักตัวอย่างและครุชชีเบลแก้วหลังเผา (มิลลิกรัม)
 W_S = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (มิลลิกรัม)

5. ปริมาณลิกนินที่ละลายในกรดทั้งหมด (Acid soluble lignin, ASL)

$$\%ASL = \left(\frac{\text{Absorbance} \times DF \times V}{W_S \times \text{Path length} \times 110} \times 100 \right) \times \left(\frac{100 - \%EXT}{100} \right)$$

โดยที่ Absorbance = ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกรองตัวอย่าง
 DF = ค่าการเจือจางน้ำกรองตัวอย่าง
 V = ปริมาตรทั้งหมดของน้ำกรองตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 W_S = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (มิลลิกรัม)
 Path length = ความยาวของเซลล์ที่ลำแสงผ่าน (เซนติเมตร)
 110 = ค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง (ลิตรต่อกรัม-เซนติเมตร)

6. ปริมาณลิกนินทั้งหมด (Total lignin)

$$\%Lignin_{Total} (\%LIG_{Total}) = \%AISL + \%ASL$$

4. เซลลูโลส (Cellulose)

การหาปริมาณเซลลูโลสทำได้โดยการคำนวณจากปริมาณสารแทรก เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า โดยมีสมมติฐานว่า องค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีเพียงสารแทรก เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เถ้า และเซลลูโลส เท่านั้น ตามการคำนวณที่ระบุใน Ayeni et al. (2013)

การคำนวณ

$$\%Cellulose (\%CEL) = 100 - (\%FS + \%EXT + \%HEM_{Total} + \%LIG_{Total})$$

โดยที่	%FS	=	ปริมาณของแข็งคงตัว (ร้อยละ)
	%EXT	=	ปริมาณสารแทรก (ร้อยละ)
	%HEM _{Total}	=	ปริมาณเซลลูโลสทั้งหมด (ร้อยละ)
	%LIG _{Total}	=	ปริมาณลิกนินทั้งหมด (ร้อยละ)





ภาคผนวก จ
รายละเอียดการเตรียม/ป่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น
และการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

**การเตรียม/บ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น
และการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง**

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
3. ถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มเชื้อจุลินทรีย์ (Stainless steel bioreactor)

ขนาด 10 ลิตร

4. ปั๊มน้ำ (Water pump)
5. สายยาง PVC (Clear PVC tubing)
6. บอลวาล์ว (Inline shut off ball valve)
7. หัวกระจายก๊าซ (Air stone)
8. ตะแกรงพลาสติก (Plastic sieve)
9. ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration apparatus) ประกอบด้วย
 - ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
 - ถ้วยกรอง (Filtering cup)
 - หัวกรอง (filtering head)
 - ตะแกรงกรอง (Sieve) ขนาดช่อง 1 x 1 มิลลิเมตร
 - ขวดลดความดัน (Suction flask)
 - แหวนรองกรวย (Rubber adapter)
 - ที่หนีบ (Clamp)
10. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME3002
11. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน

พ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 ลงในน้ำดื่มผ่านหัวกระจายก๊าซ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน (ภาพที่ ฉ.1)

2. สารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ (Test medium)

ละลายสารเคมีต่าง ๆ ตามที่ระบุในตารางที่ ฉ.1 ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร แล้วพ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 ลงในสารละลาย ผ่านหัวกระจายก๊าซ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายอาหารสำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ปราศจากออกซิเจน (ภาพที่ ฉ.1)

ตารางที่ ฉ.1

สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์

สารเคมี	จำนวน (กรัม)
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4)	0.27
ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Disodium hydrogen phosphate, Na_2HPO_4)	0.44
แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl)	0.53
แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2)	0.057
แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Magnesium chloride hexahydrate, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	0.1
เฟอร์รัสคลอไรด์เตตระไฮเดรต (Ferrous chloride tetrahydrate, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	0.02
โซเดียมซัลไฟด์ไนนาไฮเดรต (Sodium sulfide nonahydrate, $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)	0.1

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก *Annual book of ASTM standards 2001 (Vol. 11.06)*, น. 2, โดย ASTM International, 2001, Pennsylvania, United States of America: ASTM International. ปีลิขสิทธิ์ 2001 โดย ASTM International.

ภาพที่ ฉ.1

การพ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999



การเตรียมและการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น

- วิธีการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

1. กรองตะกอนจุลินทรีย์ผ่านตะแกรงพลาสติก
2. ล้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยน้ำดื่มปราศจากออกซิเจน และสารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ ตามลำดับ (ภาพที่ ฉ.2) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ตกค้างอยู่

ภาพที่ ฉ.2

การล้างตะกอนจุลินทรีย์



- วิธีการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น (Pre-incubate)

1. นำหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการเตรียมใส่ลงในถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ขนาดความจุประมาณ 10 ลิตร ซึ่งระหว่างชั้นของถังมีการหมุนเวียนน้ำจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิสำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในถัง (ภาพที่ ฉ.3)
2. เติมสารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ลงในปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยให้จุลินทรีย์ภายในถังมีปริมาณของแข็งระเหยประมาณ 80 – 90 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร
3. ปิดฝาถังให้สนิท
4. แทนที่ช่องว่างเหนือของผสมภายในถังด้วยก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 และควบคุมอุณหภูมิของการบ่มเท่ากับ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน

ภาพที่ ฉ.3

ชุดถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น

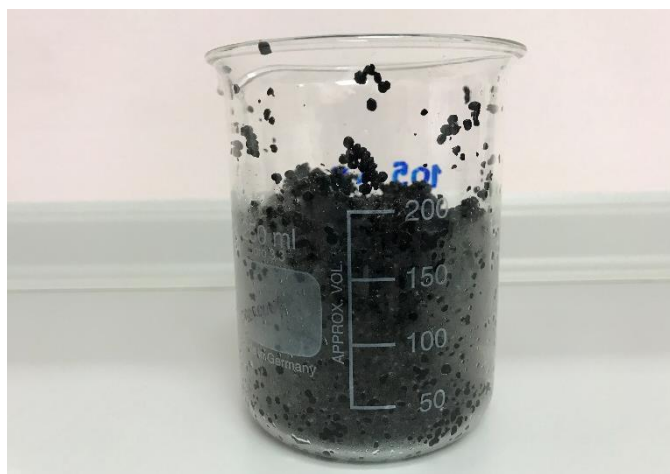


วิธีการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

1. กรองตะกอนจุลินทรีย์ผ่านตะแกรงกรอง โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลว
2. ถ่ายตะกอนจุลินทรีย์จากถ้วยกรองใส่ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร (ภาพที่ ฉ.4) ให้น้ำหนักตามที่ระบุไว้ในขั้นตอนการทดลองชุดที่ 1 และการทดลองชุดที่ 2 (บทที่ 3, หัวข้อที่ 3.8.1 และ 3.8.2)
3. นำตะกอนจุลินทรีย์ไปการดำเนินการด้านศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีต่อไป (บทที่ 3, หัวข้อที่ 3.8.1 และ 3.8.2)

ภาพที่ ฉ.4

ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์หลังการกรอง



ภาคผนวก ข
รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์



1. ระดับค่าพีเอช (pH)

การวัดระดับค่าพีเอชทำโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า (Electrometric method) ตามที่ระบุใน APHA et al. (2017)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของบริษัท accumet™ รุ่น AB150
2. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. กระจกบอกล้างน้ำกลั่น (Wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 4
2. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 7
3. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 9

วิธีวิเคราะห์

1. สอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดพีเอชด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่พีเอช 4 7 และ 9
2. ตักหัวเชื้อจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ใส่ลงใน ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร และวัดค่าพีเอชโดยใช้เครื่องวัดพีเอช

2. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดทำโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยง่ายและของแข็งคงตัวทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตามวิธีที่ระบุอยู่ในวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของ APHA et al. (2017) และ USEPA (2001)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
3. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
4. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
5. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
6. ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto dry desiccator) ของบริษัท WEIFO รุ่น DRY-60
7. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

ก. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)

1. เผาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเตาเผา
2. ปล่อยให้ถ้วยกระเบื้องให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_{dish}
3. กรองหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบ่มจากถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นถ่ายหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการกรองแล้วใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. ชั่งน้ำหนักหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการกรอง จำนวน 15 กรัม ลงในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของหัวเชื้อจุลินทรีย์และถ้วยกระเบื้อง บันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_{sample} (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10)

5. อบด้วยกระบะเบี่ยงที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ

6. ชั่งน้ำหนักด้วยกระบะเบี่ยงที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ บนตีกน้ำหนัก

7. นำด้วยกระบะเบี่ยงที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่มาอบต่อ ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบนตีกน้ำหนัก

ทำซ้ำขั้นตอนการอบ (1 ชั่วโมง) การปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ และการชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากกว่าร้อยละ 4 หรือ 50 มิลลิกรัม (เลือกใช้เกณฑ์ที่มีค่าน้อยกว่า) บนตีกน้ำหนักเป็น W_{total}

ข. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

1. นำด้วยกระบะเบี่ยงที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ (ก.7) เข้าเตาเผาขณะอุณหภูมิภายในเตาเผามีอุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 1 ชั่วโมง

2. ปล่อยให้ด้วยกระบะเบี่ยงที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบนตีกน้ำหนัก

3. นำด้วยกระบะเบี่ยงที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่มาเผาอีกครั้งหนึ่ง ที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 30 นาที ปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ ชั่งน้ำหนัก และบนตีกน้ำหนัก

ทำซ้ำขั้นตอนการเผา (30 นาที) การปล่อยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ และการชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากกว่าร้อยละ 4 หรือ 50 มิลลิกรัม (เลือกใช้เกณฑ์ที่มีค่าน้อยกว่า) บนตีกน้ำหนักเป็น $W_{volatile}$

การคำนวณ

ก. ของแข็งรวม (Total solids)

$$\% \text{Total solids} = \frac{(W_{total} - W_{dish})}{(W_{sample} - W_{dish})} \times 100$$

โดยที่ W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและด้วยกระบะเบี่ยงหลังอบ (มิลลิกรัม)

W_{dish} = น้ำหนักด้วยกระบะเบี่ยงหลังเผา (มิลลิกรัม)

W_{sample} = น้ำหนักตัวอย่างและด้วยกระบะเบี่ยงก่อนอบ (มิลลิกรัม)

ข. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids)

$$\% \text{Volatile solids} = \frac{(W_{\text{total}} - W_{\text{volatile}})}{(W_{\text{total}} - W_{\text{dish}})} \times 100$$

โดยที่ W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

W_{dish} = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

W_{volatile} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิลิตร)

ค. ของแข็งคงตัว (Fixed solids)

$$\% \text{Fixed solids} = \frac{(W_{\text{volatile}} - W_{\text{dish}})}{(W_{\text{total}} - W_{\text{dish}})} \times 100$$

โดยที่ W_{volatile} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิลิตร)

W_{dish} = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

W_{total} = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)



ภาคผนวก ซ
รายละเอียดสารเคมีและการเตรียมสารเคมีสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน



สารเคมีและการเตรียมสารเคมี
สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999
2. สายยาง PVC (Clear PVC tubing)
3. บอลวาล์ว (Inline shut off ball valve)
4. หัวกระจายก๊าซ (Air stone)
5. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME204
6. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ของบริษัท Mettler-Toledo GmoH รุ่น ME3002
7. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
8. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 และ 1,000 มิลลิลิตร
9. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน
พ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ลงในน้ำดื่มผ่านหัวกระจายก๊าซเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน
2. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, NaHCO_3)
3. สารละลายไทมอลฟทาไลน์ร้อยละ 0.4
ละลายไทมอลฟทาไลน์ (Thymolphthalein, $\text{C}_{28}\text{H}_{30}\text{O}_4$) จำนวน 20 มิลลิกรัม ลงในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 99.5 จำนวน 4.5 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นจำนวน 0.5 มิลลิลิตร
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 12
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 จำนวน 121.21 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 800 มิลลิลิตร (เตรียมในตู้ดูดควัน และวางปีกเกอร์ในสภาพพลาสติก) ปล่อยให้สารละลายเย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเติมสารละลายไทมอลฟทาไลน์ร้อยละ 0.4 จำนวน 5 มิลลิลิตร (สารละลาย ข้อ 3.) กวนผสมละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายไทมอลฟทาไลน์ให้เข้ากันดีด้วยแท่งแก้วคนสาร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในปีกเกอร์



ภาคผนวก ฅ

รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุม

กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุม
กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วม

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตะแกรงพลาสติก (Plastic sieve)
2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
3. ชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration apparatus) ประกอบด้วย
 - ปัมสุญญากาศ (Vacuum pump)
 - ถ้วยกรอง (Filtering cup)
 - หัวกรอง (filtering head)
 - ขวดลดความดัน (Suction flask)
 - แหวนรองกรวย (Rubber adapter)
 - ที่หนีบ (Clamp)
4. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

วิธีเตรียมตัวอย่าง

1. กรองของผสมภายในขวดหมักผ่านตะแกรงพลาสติก เพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลว (ภาพที่ ฅ.1)
2. นำส่วนที่เป็นสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนแขวนลอยออกจากของเหลวด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 4,900 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิขณะปั่นเหวี่ยงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส
3. นำส่วนที่เป็นของเหลวใส่มากรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว GF/C โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ (ภาพที่ ฅ.2)
4. เก็บน้ำตัวอย่างส่วนใสที่ผ่านการกรองใส่ขวดยาน้ำพลาสติก เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยการหมักร่วมในอัตราส่วนต่าง ๆ ของการทดลองชุดที่ 1 และการทดลองชุดที่ 2

ภาพที่ ฌ.1

การกรองของผสมภายในขวดหมักผ่านตะแกรงพลาสติก



ภาพที่ ฌ.2

ลักษณะของเหลวที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงและชุดกรองสุญญากาศสำหรับกรองน้ำตัวอย่าง



1. ระดับค่าพีเอช (pH)

การวัดระดับค่าพีเอชทำโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า (Electrometric method) ตามที่ระบุใน APHA et al. (2017)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของบริษัท accumet™ รุ่น AB150
2. กระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 4
2. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 7
3. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (Standard buffer solution) พีเอช 9

วิธีวิเคราะห์

1. สอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดพีเอชด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่พีเอช 4 7 และ 9
2. วัดค่าพีเอชภายในขวดหมัก โดยจุ่มโพรบวัดค่าพีเอชลงในวัสดุผสมภายในขวดหมัก และแกว่งขวดหมักให้ของผสมภายในขวดกวนผสมเข้ากันดีขณะวัดค่าพีเอช (วัสดุผสมภายในขวดหมักยังไม่ผ่านการเตรียมตัวอย่าง)

2. กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยใช้วิธี Esterification method ซึ่งดัดแปลงจาก Montgomery et al. (1962) และการวัดสี (Colorimetric method) โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ของบริษัท HACH รุ่น DR 6000
2. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
5. หลอดทดลองพร้อมฝาปิด (Test tube with screw cap)
6. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
7. ปีกเกอร์ (Beaker)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, HOCH₂CH₂OH)
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H₂SO₄) 19.2 นอร์แมล
เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 515 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
3. สารละลายไฮดรอกซิลลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride solution) ร้อยละ 10
ละลายไฮดรอกซิลลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride, NH₂OH·HCl) จำนวน 10 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution) 4.5 นอร์แมล
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 180 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร (เตรียมในตู้ดูดควัน และวางปีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้จะร้อนมาก)

5. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride sulfuric acid solution) ร้อยละ 10
ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride, FeCl_3) จำนวน 100 กรัม ในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 20 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร หลังจากนั้นกรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
6. สารละลายมาตรฐานกรดอะซิติก 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 99.8 จำนวน 4.67 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

ก. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่างจำนวน 2.0 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง
2. ปิเปตสารละลายเอทิลีนไกลคอลจำนวน 1.5 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 19.2 นอร์แมล จำนวน 0.2 มิลลิลิตร แล้วแกว่งหลอดทดลองให้สารละลายผสมเข้ากันดี
3. ต้มหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายตัวอย่าง (เปิดฝา) ในน้ำเดือดเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นนำหลอดทดลองวางลงในอ่างน้ำเย็นทันทีเพื่อให้สารละลายตัวอย่างเย็นลงจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
4. ปิเปตสารละลายไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ร้อยละ 10 จำนวน 0.5 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.5 นอร์แมล จำนวน 2.0 มิลลิลิตร แล้วแกว่งหลอดทดลองให้สารละลายผสมเข้ากันดี
5. ปิเปตสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ร้อยละ 10 จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เริ่มจับเวลา จากนั้นปิเปตน้ำกลั่นจำนวน 33.5 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดทดลอง และพลิกหลอดทดลองกลับไปมา เพื่อให้สารละลายผสมเข้ากันดี
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 495 นาโนเมตร ทันทีเมื่อครบระยะเวลา 2 นาที

ข. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมชุดสารละลายมาตรฐานกรดอะซิติกความเข้มข้น 0 50 100 200 400 600 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานกรดอะซิติกความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 0 0.5 1.0 2.0 4.0 6.0 8.0 และ 10.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร (Blank) โดยปิเปตน้ำกลั่นจำนวน 2 มิลลิลิตร และทำตามวิธีวิเคราะห์ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ ก 2. - ก 6.) แต่เติมน้ำกลั่นแทนสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร (ข้อ ก 5.)

3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 0 50 100 200 400 600 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองจำนวน 2.0 มิลลิลิตร โดยปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ ก 2. - ก 6.)

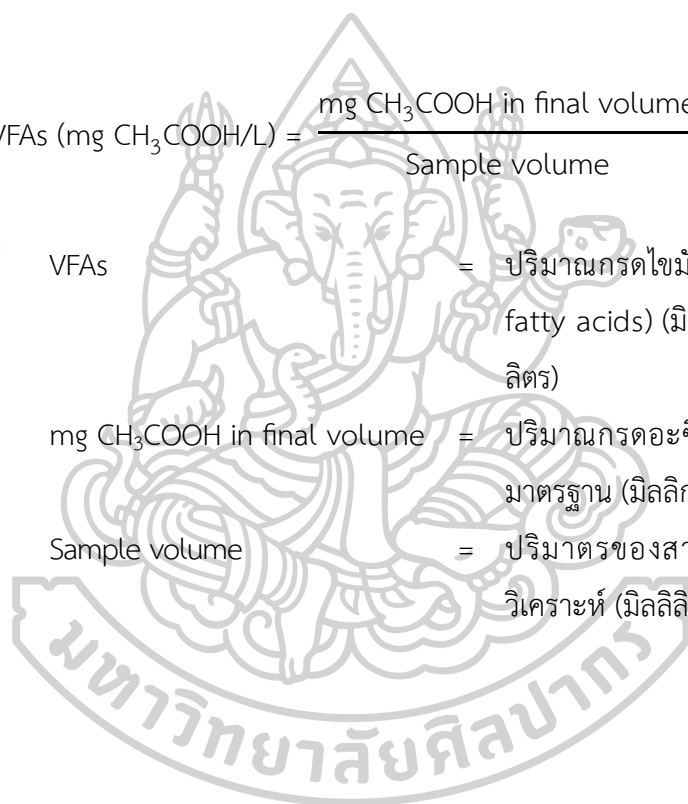
การคำนวณ

$$\text{VFAs (mg CH}_3\text{COOH/L)} = \frac{\text{mg CH}_3\text{COOH in final volume}}{\text{Sample volume}} \times 1,000$$

โดยที่ VFAs = ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids) (มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร)

mg CH₃COOH in final volume = ปริมาณกรดอะซิติกที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม)

Sample volume = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (มิลลิลิตร)



3. ความเป็นต่าง (Alkalinity)

การวิเคราะห์ความเป็นต่างใช้วิธี Titration method ตามวิธีที่ระบุใน APHA et al. (2017) ซึ่งกระทำโดยการไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก และใช้เครื่องวัดพีเอช (accumet™ AB150) ในการบอกจุดยุติ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของบริษัท accumet™ รุ่น AB150
2. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
5. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
6. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
7. กระจกนาฬิกา (Watch glass)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (Standard sulfuric acid) 0.1 นอร์มัล

ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 3 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

 - ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ประมาณ 0.05 กรัม ใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 30.0 มิลลิลิตร
 - นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นประมาณ 0.1 นอร์มัล จนสารละลายมีค่าพีเอชประมาณ 5 หยุดการไทเทรต ยกหัววัดค่าพีเอชให้อยู่เหนือสารละลายตัวอย่าง และฉีดล้างหัววัดค่าพีเอชด้วยน้ำกลั่นกลับลงไปในปีกเกอร์ สารละลายตัวอย่างเดิม
 - ปิดปีกเกอร์สารละลายตัวอย่างด้วยกระจกนาฬิกา ต้มสารละลายตัวอย่างให้เดือดเบา ๆ เป็นเวลา 3 – 5 นาที
 - ปล่อยให้สารละลายตัวอย่างเย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
 - ฉีดล้างกระจกนาฬิกาด้วยน้ำกลั่นกลับลงไปในปีกเกอร์สารละลายตัวอย่าง

- ไทเทรตสารละลายตัวอย่างต่อด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นประมาณ 0.1 นอร์แมล จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมีค่าพีเอชใกล้เคียง 4.5 คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกจากสูตรต่อไปนี้ โดยใช้น้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ของโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 53.0 กรัมโซเดียมคาร์บอเนตต่ออควิวาเลนต์ (53 g Na₂CO₃/eq)

$$N_{\text{Sulfuric acid}} = \frac{A \text{ g Na}_2\text{CO}_3}{B \text{ ml H}_2\text{SO}_4} \times \frac{\text{eq}}{53 \text{ g Na}_2\text{CO}_3} \times \frac{1000 \text{ ml}}{L}$$

โดยที่	$N_{\text{Sulfuric acid}}$	=	ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริก (นอร์แมล)
	A	=	น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต (กรัม)
	B	=	ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่างใส่ลงในปิเปเจอร์ จำนวน 30 มิลลิลิตร
2. วัดค่าพีเอชของสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่องวัดพีเอช
3. ไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก พร้อมกับวัดค่าพีเอชระหว่างไทเทรต โดยค่อย ๆ ปล่อยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกครั้งละประมาณ 0.5 มิลลิลิตร จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมีค่าพีเอชใกล้เคียง 5
4. ไทเทรตต่อ โดยค่อย ๆ ปล่อยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกครั้งละประมาณ 0.05 มิลลิลิตร จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมีค่าพีเอชใกล้เคียง 4.5 บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต

การคำนวณ

$$\text{Alkalinity (mg CaCO}_3\text{/L)} = \frac{A \times N \times 50,000}{\text{Sample volume}}$$

โดยที่	Alkalinity	=	ความเป็นด่าง (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)
	A	=	ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)
	N	=	ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (นอร์แมล)
	Sample volume	=	ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

4. ซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand, SCOD)

การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีละลาย (SCOD) ในที่นี้เป็นการใช้โพแทสเซียมไดโครเมตที่มากเกินไปพอเป็นสารออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในสารละลายตัวอย่างภายใต้สภาวะที่เป็นกรด โดยการรีฟลักซ์แบบปิด (Close reflux method) ตามที่ระบุ APHA et al. (2017) และหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ โดยการวัดสี (Colorimetric method) โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ของบริษัท MEMMERT รุ่น UF5
2. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
3. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
4. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ของบริษัท HACH รุ่น DR 6000
5. เครื่องย่อยอุณหภูมิสูง (Thermoreactor) ของบริษัท Merck รุ่น TR 420
6. หลอดย่อยตัวอย่าง (Digestion vessel)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายสำหรับการย่อยสลาย (Digestion solution) สำหรับช่วงความเข้มข้นสูง
ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) เกรดสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 10.216 กรัม ลงในน้ำกลั่นจำนวน 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 167 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมเมอคิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate, $HgSO_4$) จำนวน 33.3 กรัม ปล่อยให้เย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
2. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid reagent)
ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate, Ag_2SO_4) ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ในอัตราส่วน ซิลเวอร์ซัลเฟต 5.5 กรัม ต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 กิโลกรัม (หรือคิดเป็นอัตราส่วน 10.285 กรัม ต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร) ปล่อยให้ละลายโดยการตั้งทิ้งไว้ 1 – 2 วัน หลังจากนั้นแกว่งของผสมให้เข้ากัน

3. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP)

ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, $\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จำนวน 2.125 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร ในทางปฏิบัติควรเตรียมสารละลายนี้ใหม่ทุกสัปดาห์

ตามทฤษฎี KHP 1 มิลลิกรัม มีค่าซีไอดีเท่ากับ 1.176 มิลลิกรัมออกซิเจน และสารละลายนี้ควรวิเคราะห์ได้ค่าซีไอดีตามทฤษฎีเท่ากับ 2,500 ไมโครกรัมออกซิเจนต่อมิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

ก. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. การรีฟลักซ์สารละลายตัวอย่าง

1.1 ล้างหลอดย่อยตัวอย่างและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 ก่อนการใช้งานครั้งแรกเพื่อป้องกันการปนเปื้อน

1.2 ปิเปตสารละลายตัวอย่างใส่ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง จำนวน 2.5 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายสำหรับการย่อยสลาย จำนวน 1.5 มิลลิลิตร

1.3 ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริก จำนวน 3.5 มิลลิลิตร โดยเติมอย่างระมัดระวัง ให้สารละลายไหลลงไปตามผนังด้านในของหลอดย่อยตัวอย่าง เพื่อให้เกิดเป็นชั้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกใต้ชั้นของสารละลายตัวอย่างและสารละลายสำหรับการย่อยสลาย

1.4 ปิดฝาหลอดย่อยตัวอย่างให้แน่นหนา

1.5 ผสมของผสมในหลอดย่อยตัวอย่างให้เข้ากันดี โดยการพลิกหลอดกลับไป-มา

1.6 นำหลอดย่อยตัวอย่างไปใส่ในเครื่องย่อยอุณหภูมิสูงที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ทำการรีฟลักซ์เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

2. การเทียบสีด้วยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง

2.1 ปิดเครื่องย่อย แล้วปล่อยให้หลอดย่อยตัวอย่างเย็นลงภายในเครื่องย่อยประมาณ 20 นาที หรือจนกระทั่งเครื่องย่อยมีอุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า

2.2 ผสมของผสมในหลอดย่อยตัวอย่างให้เข้ากันดี ขณะที่ของผสมภายในหลอดย่อยยังคงอุ่นอยู่ โดยการพลิกหลอดกลับไป-มา

2.3 วางหลอดย่อยตัวอย่างลงในตะแกรงวางหลอดทดลอง ปล่อยให้เย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

2.4 วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

2.5 ทำชุดควบคุม (Blank) โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ข. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมชุดสารละลายมาตรฐานให้มีความเข้มข้นของซีโอดีเท่ากับ 0 50 100 200 400 600 และ 800 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ความเข้มข้น 2,500 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร จำนวน 0 0.05 0.10 0.20 0.40 0.60 และ 0.80 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง ปิเปตน้ำกลั่นจำนวน 2.50 2.45 2.40 2.30 2.10 1.90 และ 1.70 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2. ปิเปตสารละลายสำหรับการย่อยสลาย และปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกตามปริมาณที่ใช้ในตัวอย่าง และทำตามวิธีวิเคราะห์ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง ก 1. การรีฟลักซ์สารละลายตัวอย่าง ข้อ 1.4 – 1.6 และ ก 2. การเทียบสีด้วยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง ข้อ 2.1 – 2.5

การคำนวณ

$$\text{SCOD (mg O}_2\text{/L)} = \frac{\text{mg O}_2 \text{ in final volume}}{\text{Sample volume}} \times 1,000$$

โดยที่ SCOD = ปริมาณซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand) (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

mg O₂ in final volume = ปริมาณออกซิเจนที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม)

Sample volume = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

5. แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen, TAN)

การหาปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดทำโดยการกลั่น (Distillation) และการไทเทรต (Titration) ตามวิธีที่ระบุใน APHA et al. (2017)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ (Automatic steam distillation) ของบริษัท Gerhardt รุ่น VA820
2. หลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของบริษัท accumet™ รุ่น AB150
4. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
5. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
6. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
7. บิวเรตแก้ว (Burette glass)
8. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
9. ขวดخمพู่ (Erlenmeyer flask)
10. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 มิลลิลิตร
11. กระจกนาฬิกา (Watch glass)

สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ (borate buffer solution)
เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์แมล จำนวน 88 มิลลิลิตร ลงในสารละลายโซเดียมเตตราบอเรต ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 0.025 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร (5.0 กรัม $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ หรือ 9.5 กรัม $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ต่อ สารละลาย 1 ลิตร) แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution) 6 นอร์แมล
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 240 กรัม ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (เตรียมในตู้ดูดควัน และวางปิีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้จะร้อนมาก) เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกฝาเกลียว
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution) 1 นอร์แมล
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 40 กรัม ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

4. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid solution) 1 นอร์แมล
 ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 27.4 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร
5. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
 ละลายเมทิลเรด (Methyl red, $C_{15}H_{15}N_3O_2$) จำนวน 0.125 กรัม และเมทิลีนบลู (Methylene blue, $C_{16}H_{18}ClN_3S$) จำนวน 0.083 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในขวดปรับปริมาตร (สารละลายนี้ต้องเตรียมใหม่ทุก ๆ 2 เดือน)
6. สารละลายกรดบอริก (Boric acid) ร้อยละ 5
 ละลายกรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3) จำนวน 50 กรัม ลงในน้ำกลั่น ตั้งบนเครื่องให้ความร้อน เปิดความร้อนให้กรดบอริกละลาย ปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
7. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (Standard sulfuric acid) 0.1 นอร์แมล
 ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 3 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้โดยปฏิบัติดังนี้
 - ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ประมาณ 0.05 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 30.0 มิลลิลิตร
 - นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นประมาณ 0.1 นอร์แมล จนสารละลายมีค่าพีเอชประมาณ 5 หยุดการไทเทรต ยกหัววัดค่าพีเอชให้อยู่เหนือสารละลายตัวอย่าง และฉีกล้างหัววัดค่าพีเอชด้วยน้ำกลั่นกลับลงไป ในบีกเกอร์สารละลายตัวอย่างเดิม
 - ปิดบีกเกอร์สารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษฟิคา ต้มสารละลายตัวอย่างให้เดือดเบา ๆ เป็นเวลา 3 – 5 นาที
 - ปล่อยให้สารละลายตัวอย่างเย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
 - ฉีกล้างกระดาษฟิคาด้วยน้ำกลั่นกลับลงไป ในบีกเกอร์สารละลายตัวอย่าง
 - ไทเทรตสารละลายตัวอย่างต่อด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นประมาณ 0.1 นอร์แมล จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมีค่าพีเอชใกล้เคียง 4.5 คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกจากสูตรต่อไปนี้ โดยใช้น้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ของโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 53.0 กรัมโซเดียมคาร์บอเนตต่ออควิวาเลนต์ ($53 \text{ g } Na_2CO_3/\text{eq}$)

$$N_{\text{Sulfuric acid}} = \frac{A \text{ g Na}_2\text{CO}_3}{B \text{ ml H}_2\text{SO}_4} \times \frac{\text{eq}}{53 \text{ g Na}_2\text{CO}_3} \times \frac{1000 \text{ ml}}{L}$$

โดยที่	$N_{\text{Sulfuric acid}}$	=	ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริก (นอร์มัล)
	A	=	น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต (กรัม)
	B	=	ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

วิธีวิเคราะห์

ก. การกลั่น

1. เปิดเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติให้พร้อมใช้งานและตั้งค่าเวลาการกลั่น เป็นเวลา 300 วินาที จากนั้นเปิดน้ำเย็นผ่านเข้าเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ
2. ปิเปตสารละลายกรดบอริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายอินดิเคเตอร์ผสม จำนวน 300 ไมโครลิตร ลงในขวดชมพู จากนั้นนำไปวางตรงตำแหน่งที่รองรับก๊าซแอมโมเนียจากการกลั่น โดยให้ปลายสายยางของชุดควบคุมแน่นจุ่มอยู่ใต้สารละลาย
4. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ปรับค่าพีเอชให้เป็นกลางแล้ว จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่าง
5. เติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ จำนวน 3 มิลลิลิตร และปรับพีเอชให้เป็น 9.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล (จำนวน 3 หยด)
6. นำหลอดแก้วสำหรับการย่อยตัวอย่างต่อเข้ากับเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ จากนั้นกดปุ่มเริ่มการทำงานของเครื่องกลั่นแบบอัตโนมัติ (Run)
7. นำสารละลายที่กลั่นได้ (Distillate) ปริมาตรประมาณ 75 มิลลิลิตร ไปทำการไทเทรตในขั้นตอนต่อไป
8. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยใช้น้ำกลั่นแทนสารละลายตัวอย่าง และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ ก.2. – ก.7.)

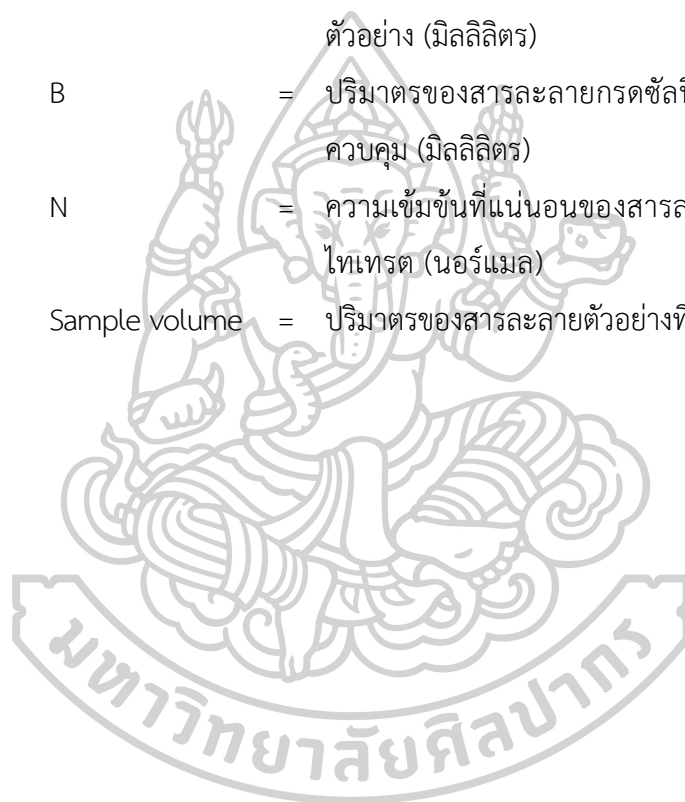
ข. การไทเทรต

ไทเทรตสารละลายในขวดชมพูที่กลั่นได้จากขั้นตอนการกลั่น (ก.6.) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์มัล เมื่อถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีม่วงอ่อน (Pale lavender)

การคำนวณ

$$\text{TAN (mg N/L)} = \frac{(A - B) \times N \times 14}{\text{Sample volume}} \times 1,000$$

โดยที่	TAN	= ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen) (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)
	A	= ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับชุดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
	B	= ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)
	N	= ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (นอร์แมล)
	Sample volume	= ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (มิลลิลิตร)





ภาคผนวก ญ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีบางประการ
ของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

ตารางที่ ญ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพ
บรรจุอาหาร

วัสดุตั้งต้น	การ วิเคราะห์ซ้ำ	TS (%)	VS (%TS)	FS (%TS)	OC (%TS)	TKN (%TS)	TP (%TS)	COD (mg O ₂ g ⁻¹ VS)	C/N ratio*
เศษอาหาร	1	16.32	95.75	4.25	64.94	5.50	0.029	1,314.78	12 : 1
	2	16.43	96.96	3.04	64.52	5.49	0.029	1,339.08	
	3	16.36	96.33	3.67	64.65	5.47	0.029	1,350.72	
ผลิตภัณฑ์เยื่อ ชีวภาพบรรจุ อาหาร	1	98.47	99.53	0.47	50.79	0.11	ตรวจไม่พบ	1,096.76	460 : 1
	2	98.39	99.51	0.49	50.45	0.11	ตรวจไม่พบ	1,114.79	
	3	98.55	99.51	0.49	50.66	0.12	ตรวจไม่พบ	1,111.18	

หมายเหตุ. * คำนวณจาก $C/N = OC/TKN$

- TS คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids)
- VS คือ ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids)
- FS คือ ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed solids)
- OC คือ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)
- TKN คือ ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)
- TP คือ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus)
- COD คือ ปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand)
- C/N ratio คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio)

ตารางที่ ญ.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร

วัสดุตั้งต้น	การวิเคราะห์ซ้ำ	CEL* (%TS)	EXT (%TS)	HEM (%TS)	AISL (%TS)	ASL (%)	LIG (%TS)
เศษอาหาร	1	0.85	5.24	82.80	0.53	8.00	8.53
	2		5.10	79.63	0.56	8.03	8.59
	3		5.14	83.18	0.43	7.85	8.28
ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร	1	79.15	0.00	7.35	12.72	0.59	13.31
	2		0.00	7.37	11.98	0.61	12.59
	3		0.00	7.42	12.47	0.59	13.06

หมายเหตุ. * คำนวณจาก $\%CEL = 100 - (\%FS + \%EXT + \%HEM + \%LIG)$ โดยที่ $\%EXT$

(Extractive หรือ สารแทรก) = 0 (ตรวจไม่พบ)

CEL คือ ปริมาณเซลลูโลส (Cellulose)

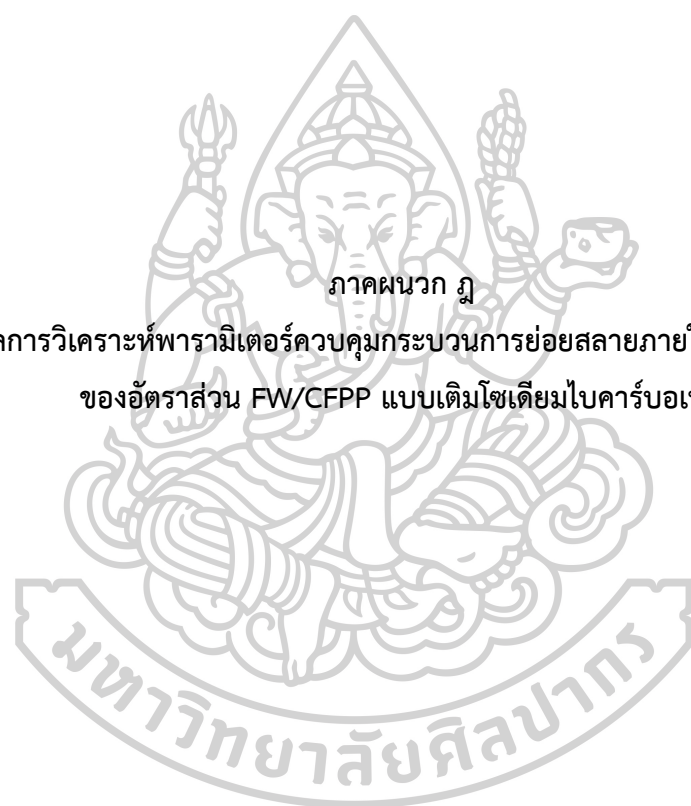
EXT คือ ปริมาณสารแทรก (Extractives)

HEM คือ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

AISL คือ ปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรด (Acid insoluble lignin)

ASL คือ ปริมาณลิกนินที่ละลายในกรด (Acid soluble lignin)

LIG คือ ปริมาณลิกนิน (Lignin)



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ
ของอัตราส่วน FW/CFPP แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต

ตารางที่ ๑.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	ค่าพีเอช							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	6.99	6.42	6.61	6.91	7.26	7.46	7.51	7.48
FW/CFPP 80:20	7.18	6.63	7.05	7.20	7.34	7.38	7.60	7.31
FW/CFPP 60:40	7.20	6.89	6.99	7.39	7.36	7.36	7.42	7.30
FW/CFPP 40:60	7.71	7.00	7.20	7.13	7.49	7.24	7.36	7.22
FW/CFPP 20:80	7.77	7.27	7.04	7.33	7.14	7.10	7.22	7.23
FW/CFPP 0:100	8.07	7.75	7.15	6.96	6.97	7.03	7.16	7.21

หมายเหตุ. FW/CFPP 100:0	คือ	เศษอาหารเพียงอย่างเดียว
FW/CFPP 80:20	คือ	อัตราส่วนวัสดุตั้งต้นระหว่างเศษอาหารร้อยละ 80 และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารร้อยละ 20
FW/CFPP 60:40	คือ	อัตราส่วนวัสดุตั้งต้นระหว่างเศษอาหารร้อยละ 60 และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารร้อยละ 40
FW/CFPP 40:60	คือ	อัตราส่วนวัสดุตั้งต้นระหว่างเศษอาหารร้อยละ 60 และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารร้อยละ 40
FW/CFPP 20:80	คือ	อัตราส่วนวัสดุตั้งต้นระหว่างเศษอาหารร้อยละ 20 และผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารร้อยละ 80
FW/CFPP 0:100	คือ	ผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหารเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ ๓.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการดัดแปรพันธุกรรมแบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	การดัดแปรพันธุกรรมแบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)											
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60				
FW/CFPP 100:0	1	1,243.88	6,046.03	5,141.79	3,813.65	1,446.39	248.79	426.92	185.05				
	2	1,302.19	5,921.08	5,479.09	4,193.11	1,373.26	207.58	447.33	160.32				
FW/CFPP 80:20	1	1,063.43	4,567.46	2,464.42	1,326.01	240.54	179.37	127.50	99.76				
	2	1,038.44	4,484.16	2,401.18	1,494.67	250.89	169.12	101.15	108.23				
FW/CFPP 60:40	1	767.72	2,297.53	869.95	420.21	43.42	115.85	139.66	93.41				
	2	763.55	2,255.88	841.85	265.61	93.09	124.04	97.10	95.53				
FW/CFPP 40:60	1	537.96	894.02	481.26	288.51	102.78	126.09	54.54	80.71				
	2	519.22	852.37	529.44	439.09	94.50	130.19	66.70	82.82				
FW/CFPP 20:80	1	269.32	209.61	358.03	340.46	320.79	103.55	44.41	61.66				
	2	315.14	176.29	336.95	343.98	306.99	101.50	99.13	78.59				
FW/CFPP 0:100	1	106.89	86.06	410.11	859.70	271.19	130.60	194.21	143.83				
	2	106.89	83.98	500.05	834.41	154.18	77.61	167.67	125.28				

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของปริมาตรความแตกต่างแบบเติมโฆเตียมไปคาร์บอนเตต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	การเปรียบเทียบ (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	4,223.94	4,523.42	5,313.10	6,044.90	7,123.47	8,023.61	7,809.09	7,248.66		
	2	4,232.27	4,476.20	5,272.85	6,028.04	7,123.47	8,023.61	7,978.65	7,223.92		
FW/CFPP 80:20	1	4,167.01	4,523.42	5,665.29	6,213.52	6,731.30	5,871.44	6,267.22	6,564.20		
	2	4,176.33	4,542.31	5,584.79	6,255.68	6,740.31	5,895.24	6,289.47	6,547.71		
FW/CFPP 60:40	1	4,139.04	4,608.41	5,453.98	5,935.30	6,109.54	5,379.51	5,651.62	5,879.74		
	2	4,157.69	4,646.18	5,413.73	5,935.30	6,082.50	5,371.57	5,681.29	5,879.74		
FW/CFPP 40:60	1	4,334.81	4,848.27	5,202.41	5,488.47	5,568.87	4,839.97	5,176.95	5,376.71		
	2	4,316.16	4,853.94	5,212.47	5,522.19	5,550.85	4,903.45	5,191.78	5,393.20		
FW/CFPP 20:80	1	4,325.49	4,768.95	4,991.09	5,007.91	4,992.16	4,324.24	4,650.35	4,741.73		
	2	4,344.13	4,806.72	4,950.84	5,007.91	5,028.20	4,308.37	4,665.19	4,733.48		
FW/CFPP 0:100	1	4,474.64	4,636.74	4,538.27	4,375.60	4,694.18	4,738.49	5,133.84	4,477.84		
	2	4,456.00	4,627.30	4,538.27	4,384.03	4,657.65	4,798.69	5,133.84	4,510.83		

ตารางที่ ๓.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด แบบเดิมไฮเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)

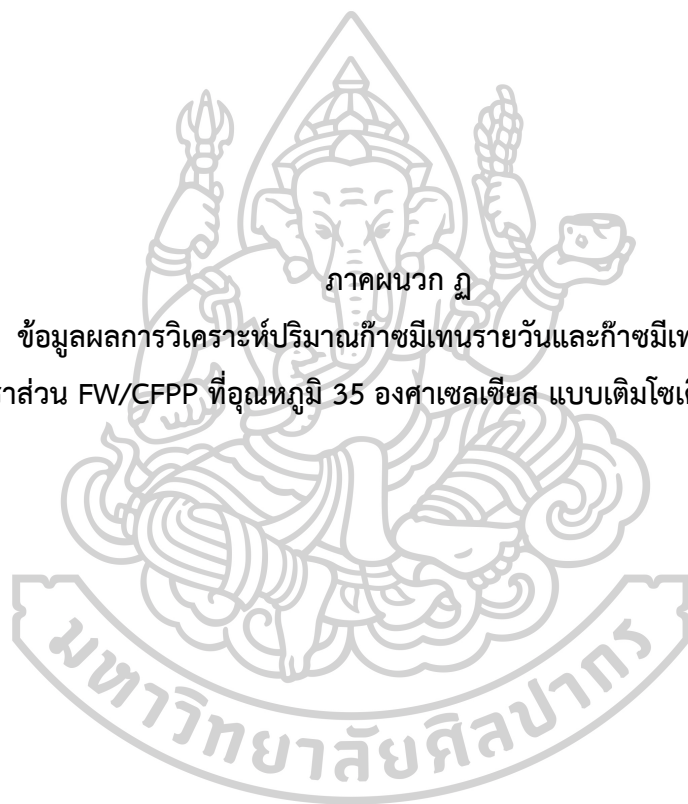
อัตราส่วน	การวิเคราะห์	แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	101.80	481.90	667.76	821.50	855.36	1,000.50	1,074.15	938.61		
	2	93.97	501.73	659.31	803.80	863.04	1,011.34	1,058.32	945.54		
FW/CFPP 80:20	1	101.80	390.68	579.01	644.45	673.67	639.83	700.89	761.98		
	2	93.97	390.68	574.78	633.83	654.75	626.50	691.55	775.83		
FW/CFPP 60:40	1	93.97	291.52	388.82	478.03	488.22	486.54	538.91	606.12		
	2	93.97	299.45	380.37	467.41	480.65	486.54	554.48	609.58		
FW/CFPP 40:60	1	90.05	235.99	291.62	336.39	355.76	366.57	404.96	464.11		
	2	90.05	235.99	291.62	336.39	351.97	366.57	423.65	471.04		
FW/CFPP 20:80	1	86.14	176.50	194.41	208.92	200.59	203.28	280.36	318.64		
	2	86.14	168.57	202.86	201.83	196.80	203.28	271.01	325.57		
FW/CFPP 0:100	1	82.22	105.11	88.75	77.90	84.39	115.58	215.62	221.67		
	2	82.22	105.11	84.53	84.98	88.22	115.58	223.53	218.20		

ตารางที่ ๕.5

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของปริมาณซีไอแต่ละลาย แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเตต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ซีไอแต่ละลาย (มีลิแกนด์ออกซิเจนต่อลิตร)											
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60				
FW/CFPP 100:0	1	5,859.27	10,096.67	10,868.16	9,643.56	4,091.29	1,642.00	1,261.77	980.51				
	2	6,387.15	10,361.15	10,736.05	10,034.69	4,123.96	1,664.15	1,248.47	1,006.74				
FW/CFPP 80:20	1	4,711.23	7,584.11	5,847.86	3,387.62	1,184.32	821.14	503.25	538.24				
	2	5,140.13	7,187.40	5,979.97	3,126.86	1,200.76	801.44	503.25	538.24				
FW/CFPP 60:40	1	3,510.35	3,957.36	2,692.73	1,237.12	697.30	415.23	456.01	439.31				
	2	3,774.29	4,188.78	2,890.90	1,193.66	703.88	415.23	450.76	444.65				
FW/CFPP 40:60	1	2,359.58	1,910.92	1,569.77	781.16	561.31	441.50	301.14	335.03				
	2	2,385.98	2,087.24	1,635.83	927.84	561.31	449.38	298.52	332.35				
FW/CFPP 20:80	1	1,232.58	480.71	667.54	657.97	716.89	260.23	214.52	265.51				
	2	1,318.36	474.10	561.85	605.82	710.32	260.23	214.52	268.18				
FW/CFPP 0:100	1	219.06	254.35	644.24	1,068.81	413.18	321.91	334.50	274.17				
	2	227.86	263.17	644.24	1,081.84	478.52	310.84	422.26	263.68				

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม
ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ ฎ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุมและชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)															
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60				
Control	1	5.87	5.87	5.87	5.87	5.87	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	5.13	5.13	5.13
	2	6.32	6.32	6.32	6.32	6.32	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	5.33	5.33	5.33
FW/CFPP 100:0	1	110.66	72.91	26.06	17.34	10.67	13.49	19.10	11.69	11.79	13.04	13.04	13.04	13.04	6.57	6.57	8.42
	2	105.08	89.66	73.77	45.68	35.67	25.33	13.80	21.64	8.53	7.20	7.20	7.20	11.70	11.70	7.41	7.41
	3	110.66	84.73	66.67	35.68	17.33	11.13	17.78	16.67	8.03	13.04	13.04	13.04	10.68	10.68	6.41	6.41
FW/CFPP 80:20	1	56.85	38.42	27.75	19.01	14.00	20.60	16.45	10.45	9.28	6.23	6.23	6.23	5.54	5.54	5.41	5.41
	2	49.24	31.86	22.67	22.34	24.00	20.60	17.78	11.69	9.28	7.20	7.20	7.20	5.54	5.54	6.41	6.41
	3	46.07	22.10	15.80	10.68	17.21	15.43	10.59	15.48	10.48	6.38	6.38	6.38	6.34	6.34	5.38	5.38
FW/CFPP 60:40	1	26.40	23.65	20.98	19.01	19.00	15.86	15.12	10.45	9.28	5.26	5.26	5.26	4.52	4.52	6.41	6.41
	2	36.05	18.81	20.85	19.02	18.86	14.18	13.11	9.24	6.74	7.38	7.38	7.38	6.34	6.34	4.38	4.38
	3	38.56	18.81	17.48	12.35	17.21	11.69	9.33	11.74	7.99	7.38	7.38	7.38	5.35	5.35	3.39	3.39
FW/CFPP 40:60	1	49.24	41.71	46.36	49.02	34.00	20.60	12.47	9.20	8.03	8.18	8.18	8.18	5.54	5.54	6.41	6.41
	2	59.39	51.56	36.21	25.68	17.33	13.49	12.47	9.20	11.79	7.20	7.20	7.20	5.54	5.54	6.41	6.41
	3	38.56	32.00	29.25	20.69	15.55	11.69	8.07	7.99	7.99	6.38	6.38	6.38	8.32	8.32	2.99	2.99
FW/CFPP 20:80	1	61.93	63.05	49.75	40.01	24.00	21.78	13.80	12.94	13.05	5.26	5.26	5.26	4.52	4.52	6.41	6.41
	2	51.08	28.70	22.53	14.01	10.59	9.21	5.55	7.99	5.49	8.38	8.38	8.38	5.35	5.35	3.39	3.39
	3	66.10	58.40	42.70	27.36	20.52	14.18	10.59	10.49	7.99	7.38	7.38	7.38	7.33	7.33	5.38	5.38
FW/CFPP 0:100	1	79.70	74.88	49.75	34.01	24.00	9.94	9.82	9.20	8.03	5.65	5.65	5.65	3.90	3.90	3.01	3.01
	2	84.77	74.88	46.36	27.34	17.33	13.49	12.47	9.20	5.52	6.23	6.23	6.23	5.54	5.54	5.41	5.41
	3	44.16	61.74	49.75	60.69	49.00	31.25	24.41	17.91	11.79	7.20	7.20	7.20	6.57	6.57	9.42	9.42

ตารางที่ ฅ.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	314.67	88.76	79.09	84.99	88.95	97.54	108.31	110.42	139.88	125.68	125.45			
	2	0.00	330.67	108.62	74.11	54.81	49.15	52.27	82.38	66.99	92.04	118.16	124.96			
	3	0.00	345.67	123.52	59.17	90.02	69.05	67.36	69.41	91.42	114.96	113.15	118.08			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	314.67	148.34	158.77	180.56	143.68	147.85	138.56	156.57	109.98	52.53	51.77			
	2	0.00	334.67	148.34	128.89	150.38	153.63	162.94	152.39	167.97	142.37	70.07	39.00			
	3	0.00	310.11	142.67	146.04	156.82	160.14	117.86	154.48	160.08	142.92	96.91	34.18			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	285.67	188.07	178.69	190.62	133.73	137.79	160.17	178.82	121.94	53.03	48.83			
	2	0.00	252.86	203.10	179.79	135.14	136.83	102.36	109.29	210.31	132.20	49.05	46.67			
	3	0.00	248.09	182.96	179.79	143.81	119.35	102.36	149.46	205.29	114.83	64.01	59.16			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	239.67	173.17	108.97	110.14	113.83	127.73	103.99	80.56	74.61	67.56	56.19			
	2	0.00	255.67	143.38	108.97	110.14	123.78	117.67	116.95	85.99	72.11	65.06	56.19			
	3	0.00	205.15	147.71	126.75	155.09	148.48	164.35	194.64	197.75	68.36	41.57	41.67			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	149.67	108.62	123.91	105.11	98.90	77.42	52.13	64.27	64.64	67.56	68.47			
	2	0.00	127.86	117.50	155.68	148.15	165.97	164.35	179.58	156.57	73.46	56.53	49.17			
	3	0.00	132.63	102.39	146.04	122.13	165.97	123.02	114.31	65.66	60.69	71.48	74.14			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	1.67	4.35	19.33	140.32	193.43	167.97	86.70	94.13	111.97	95.12	83.70			
	2	0.00	2.67	7.33	7.38	90.02	179.50	152.88	108.31	96.85	107.49	98.12	95.98			
	3	0.00	4.67	4.35	6.38	59.84	108.85	112.64	91.02	80.56	97.53	75.08	46.37			

ตารางที่ ๕.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมไนโตรเจนไปคาร์บอนเมต (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	104.79	67.04	20.19	11.47	4.80	7.33	12.94	5.52	5.63	7.91	1.44	3.28		
	2	99.21	83.79	67.90	39.81	29.80	19.16	7.63	15.47	2.36	2.07	6.57	2.28		
	3	104.79	78.86	60.80	29.81	11.46	4.96	11.61	10.50	1.86	7.91	5.54	1.28		
FW/CFPP 80:20	1	50.98	32.55	21.88	13.14	8.13	14.43	10.28	4.28	3.12	1.10	0.41	0.28		
	2	43.37	25.99	16.80	16.47	18.13	14.43	11.61	5.52	3.12	2.07	0.41	1.28		
	3	39.75	15.78	9.48	4.35	10.88	9.05	4.22	9.11	4.10	1.06	1.01	0.05		
FW/CFPP 60:40	1	20.53	17.78	15.11	13.14	13.13	9.69	8.96	4.28	3.12	0.12	0.00	1.28		
	2	29.73	12.48	14.52	12.70	12.54	7.81	6.74	2.86	0.36	2.05	1.01	0.00		
	3	32.23	12.48	11.16	6.02	10.88	5.32	2.95	5.36	1.61	2.05	0.02	0.00		
FW/CFPP 40:60	1	43.37	35.84	40.49	43.15	28.13	14.43	6.30	3.04	1.86	3.04	0.41	1.28		
	2	53.52	45.69	30.34	19.81	11.46	7.33	6.30	3.04	5.63	2.07	0.41	1.28		
	3	32.23	25.68	22.93	14.36	9.23	5.32	1.69	1.62	1.61	1.06	2.99	0.00		
FW/CFPP 20:80	1	56.06	57.18	43.88	34.14	18.13	15.61	7.63	6.77	6.88	0.12	0.00	1.28		
	2	44.75	22.38	16.20	7.69	4.27	2.83	0.00	1.62	0.00	3.05	0.02	0.00		
	3	59.78	52.07	36.38	21.04	14.19	7.81	4.22	4.11	1.61	2.05	2.00	0.05		
FW/CFPP 0:100	1	73.83	69.01	43.88	28.14	18.13	3.78	3.65	3.04	1.86	0.51	0.00	0.00		
	2	78.90	69.01	40.49	21.47	11.46	7.33	6.30	3.04	0.00	1.10	0.41	0.28		
	3	38.29	55.87	43.88	54.82	43.13	25.08	18.24	11.74	5.63	2.07	1.44	4.28		

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	314.67	404.10	483.54	567.97	657.41	754.31	881.21	1,083.85	1,364.85	1,615.65	1,871.25			
	2	0.00	330.67	440.10	514.54	568.97	618.41	670.31	767.21	889.85	1,074.85	1,310.65	1,565.25			
	3	0.00	345.37	472.00	533.64	625.28	696.92	765.74	849.57	1,020.90	1,255.51	1,484.95	1,729.23			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	314.67	464.10	623.54	802.97	947.41	1,094.31	1,256.21	1,543.85	1,764.85	1,869.65	1,975.25			
	2	0.00	334.67	484.10	613.54	762.97	917.41	1,079.31	1,257.21	1,565.85	1,851.85	1,991.65	2,071.25			
	3	0.00	325.37	467.00	618.64	800.28	936.92	1,050.74	1,204.57	1,523.90	1,803.51	1,997.95	2,066.23			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	285.67	475.10	654.54	843.97	978.41	1,115.31	1,302.21	1,630.85	1,875.85	1,981.65	2,081.25			
	2	0.00	265.37	467.00	653.64	810.28	926.92	1,025.74	1,134.57	1,553.90	1,812.51	1,910.95	2,004.23			
	3	0.00	260.37	442.00	628.64	795.28	896.92	995.74	1,144.57	1,553.90	1,778.51	1,906.95	2,025.23			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	239.67	414.10	523.54	632.97	747.41	874.31	996.21	1,143.85	1,293.85	1,428.65	1,543.25			
	2	0.00	255.67	400.10	509.54	618.97	743.41	860.31	997.21	1,154.85	1,299.85	1,429.65	1,544.25			
	3	0.00	215.37	362.00	493.64	673.28	799.92	958.74	1,152.57	1,546.90	1,680.51	1,763.95	1,847.23			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	149.67	259.10	383.54	487.97	587.41	664.31	726.21	843.85	973.85	1,108.65	1,248.25			
	2	0.00	134.37	251.00	412.64	584.28	725.92	884.74	1,063.57	1,375.90	1,519.51	1,632.95	1,731.23			
	3	0.00	139.37	241.00	392.64	534.28	675.92	794.74	908.57	1,039.90	1,158.51	1,301.95	1,450.23			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	1.67	6.10	25.54	164.97	359.41	526.31	628.21	800.85	1,025.85	1,215.65	1,386.25			
	2	0.00	2.67	10.10	17.54	106.97	287.41	439.31	566.21	743.85	959.85	1,155.65	1,351.25			
	3	0.00	4.67	9.10	15.54	74.97	184.41	296.31	403.21	550.85	746.85	896.65	991.25			

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
FW/CFPP 100:0	1	2,077.61	2,281.78	2,341.37	2,375.78	2,390.10	2,421.68	2,469.83	2,492.09	2,514.44	2,555.39	2,561.93	2,578.24			
	2	1,760.61	2,015.78	2,216.37	2,335.78	2,425.10	2,506.68	2,534.83	2,597.09	2,606.44	2,617.39	2,648.93	2,660.24			
	3	1,934.69	2,173.47	2,351.73	2,439.77	2,472.73	2,493.44	2,535.78	2,577.20	2,583.72	2,623.68	2,649.26	2,654.60			
FW/CFPP 80:20	1	2,075.61	2,174.78	2,239.37	2,278.78	2,303.10	2,364.68	2,402.83	2,420.09	2,432.44	2,438.39	2,439.93	2,441.24			
	2	2,156.61	2,235.78	2,285.37	2,334.78	2,389.10	2,450.68	2,493.83	2,516.09	2,528.44	2,539.39	2,540.93	2,547.24			
	3	2,145.69	2,193.47	2,221.73	2,234.77	2,267.73	2,303.44	2,320.78	2,357.20	2,373.72	2,378.68	2,384.26	2,384.60			
FW/CFPP 60:40	1	2,121.61	2,175.78	2,220.37	2,259.78	2,299.10	2,340.68	2,373.83	2,391.09	2,403.44	2,404.39	2,404.39	2,410.70			
	2	2,063.69	2,101.47	2,144.73	2,182.77	2,220.73	2,251.44	2,278.78	2,290.20	2,291.72	2,301.68	2,307.26	2,307.26			
	3	2,089.69	2,127.47	2,160.73	2,178.77	2,211.73	2,232.44	2,244.78	2,266.20	2,272.72	2,282.68	2,283.26	2,283.26			
FW/CFPP 40:60	1	1,628.61	1,737.78	1,857.37	1,986.78	2,071.10	2,132.68	2,155.83	2,168.09	2,175.44	2,191.39	2,192.93	2,199.24			
	2	1,649.61	1,788.78	1,878.37	1,937.78	1,972.10	2,003.68	2,026.83	2,039.09	2,061.44	2,072.39	2,073.93	2,080.24			
	3	1,911.69	1,989.47	2,057.73	2,100.77	2,128.73	2,149.44	2,156.78	2,163.20	2,169.72	2,174.68	2,190.26	2,190.26			
FW/CFPP 20:80	1	1,358.61	1,532.78	1,662.37	1,764.78	1,819.10	1,885.68	1,913.83	1,941.09	1,968.44	1,969.39	1,969.39	1,975.70			
	2	1,820.69	1,888.47	1,936.73	1,959.77	1,972.73	1,983.44	1,983.44	1,989.86	1,989.86	2,004.82	2,005.40	2,005.40			
	3	1,569.69	1,727.47	1,835.73	1,898.77	1,941.73	1,972.44	1,989.78	2,006.20	2,012.72	2,022.68	2,033.26	2,033.60			
FW/CFPP 0:100	1	1,531.61	1,741.78	1,871.37	1,955.78	2,010.10	2,026.68	2,039.83	2,052.09	2,059.44	2,062.39	2,062.39	2,062.39			
	2	1,506.61	1,716.78	1,836.37	1,900.78	1,935.10	1,966.68	1,989.83	2,002.09	2,002.09	2,008.03	2,009.57	2,010.88			
	3	1,066.61	1,236.78	1,366.37	1,530.78	1,660.10	1,766.68	1,834.83	1,882.09	1,904.44	1,915.39	1,921.93	1,943.24			



ภาคผนวก รฐ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม
ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่สภาวะมาตรฐาน แบบเต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต

ตารางที่ ฐ.1
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน แบบเดิมโดยใช้เตาไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	281.28	79.34	70.70	75.97	79.52	87.20	96.82	98.71	125.04	112.35	112.14			
	2	0.00	295.59	97.10	66.25	48.99	43.94	46.73	73.64	59.88	82.28	105.63	111.70			
	3	0.00	308.99	110.41	52.89	80.47	61.73	60.22	62.05	81.72	102.77	101.15	105.55			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	281.28	132.61	141.93	161.41	128.44	132.16	123.86	139.96	98.31	46.96	46.28			
	2	0.00	299.16	132.61	115.22	134.43	137.33	145.65	136.22	150.15	127.26	62.63	34.87			
	3	0.00	277.21	127.54	130.54	140.19	143.15	105.35	138.09	143.10	127.76	86.63	30.56			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	255.36	168.11	159.73	170.40	119.54	123.17	143.17	159.85	109.00	47.41	43.65			
	2	0.00	226.04	181.55	160.71	120.80	122.31	91.50	97.70	188.00	118.17	43.85	41.72			
	3	0.00	221.77	163.55	160.71	128.56	106.69	91.50	133.60	183.51	102.65	57.21	52.88			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	214.24	154.80	97.41	98.46	101.75	114.18	92.96	72.01	66.69	60.39	50.23			
	2	0.00	228.54	128.17	97.41	98.46	110.65	105.18	104.54	76.87	64.46	58.16	50.23			
	3	0.00	183.39	132.04	113.30	138.64	132.73	146.91	173.99	176.77	61.10	37.16	37.25			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	133.79	97.10	110.76	93.96	88.41	69.21	46.60	57.46	57.78	60.39	61.21			
	2	0.00	114.30	105.03	139.16	132.43	148.36	146.91	160.52	139.96	65.67	50.53	43.95			
	3	0.00	118.56	91.53	130.54	109.17	148.36	109.97	102.19	58.69	54.26	63.90	66.28			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	1.49	3.89	17.28	125.44	172.91	150.15	77.50	84.15	100.10	85.03	74.82			
	2	0.00	2.38	6.55	6.59	80.47	160.46	136.66	96.82	86.57	96.09	87.71	85.80			
	3	0.00	4.17	3.89	5.70	53.49	97.31	100.69	81.37	72.01	87.18	67.11	41.45			

ตารางที่ ฐ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิกรัมมาตรฐาน)											
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60
FW/CFPP 100:0	1	93.67	59.92	18.05	10.25	4.29	6.55	11.56	4.94	5.03	7.07	1.28	2.93
	2	88.68	74.90	60.70	35.59	26.64	17.13	6.82	13.83	2.11	1.85	5.87	2.04
	3	93.67	70.49	54.35	26.65	10.25	4.43	10.38	9.39	1.67	7.07	4.95	1.14
FW/CFPP 80:20	1	45.57	29.10	19.56	11.74	7.27	12.90	9.19	3.83	2.79	0.98	0.37	0.25
	2	38.77	23.23	15.02	14.72	16.21	12.90	10.38	4.94	2.79	1.85	0.37	1.14
	3	35.53	14.11	8.47	3.89	9.73	8.09	3.77	8.14	3.67	0.94	0.91	0.05
FW/CFPP 60:40	1	18.35	15.89	13.51	11.74	11.74	8.67	8.01	3.83	2.79	0.11	0.00	1.14
	2	26.58	11.16	12.98	11.35	11.21	6.98	6.02	2.56	0.32	1.84	0.91	0.00
	3	28.81	11.16	9.98	5.38	9.73	4.75	2.64	4.79	1.44	1.84	0.02	0.00
FW/CFPP 40:60	1	38.77	32.04	36.20	38.57	25.15	12.90	5.63	2.71	1.67	2.72	0.37	1.14
	2	47.84	40.84	27.12	17.70	10.25	6.55	5.63	2.71	5.03	1.85	0.37	1.14
	3	28.81	22.95	20.50	12.84	8.25	4.75	1.51	1.44	1.44	0.94	2.68	0.00
FW/CFPP 20:80	1	50.11	51.12	39.22	30.52	16.21	13.96	6.82	6.05	6.15	0.11	0.00	1.14
	2	40.00	20.01	14.49	6.87	3.81	2.53	0.00	1.44	0.00	2.73	0.02	0.00
	3	53.43	46.55	32.52	18.81	12.69	6.98	3.77	3.68	1.44	1.84	1.79	0.05
FW/CFPP 0:100	1	65.99	61.69	39.22	25.16	16.21	3.38	3.26	2.71	1.67	0.46	0.00	0.00
	2	70.53	61.69	36.20	19.19	10.25	6.55	5.63	2.71	0.00	0.98	0.37	0.25
	3	34.23	49.94	39.22	49.00	38.55	22.42	16.31	10.50	5.03	1.85	1.28	3.83

ตารางที่ ๒.๒

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1)

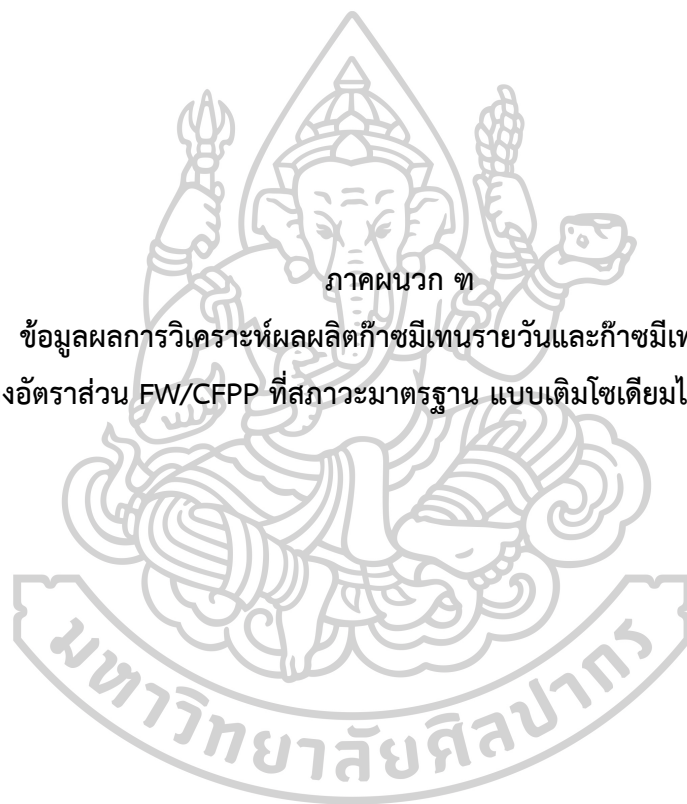
อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	281.28	361.23	432.24	507.72	587.66	674.28	787.72	968.86	1,220.05	1,444.25	1,672.73			
	2	0.00	295.59	393.41	459.95	508.61	552.80	599.19	685.81	795.44	960.82	1,171.60	1,399.19			
	3	0.00	308.73	421.93	477.03	558.94	622.98	684.51	759.44	912.59	1,122.32	1,327.41	1,545.77			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	281.28	414.87	557.39	717.79	846.90	978.21	1,122.93	1,380.06	1,577.62	1,671.30	1,765.70			
	2	0.00	299.16	432.74	548.45	682.03	820.08	964.80	1,123.83	1,399.73	1,655.39	1,780.36	1,851.51			
	3	0.00	290.85	417.46	553.01	715.38	837.52	939.27	1,076.78	1,362.23	1,612.18	1,785.99	1,847.02			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	255.36	424.70	585.10	754.44	874.61	996.98	1,164.05	1,457.83	1,676.84	1,771.42	1,860.45			
	2	0.00	237.21	417.46	584.30	724.32	828.58	916.92	1,014.20	1,389.05	1,620.22	1,708.22	1,791.60			
	3	0.00	232.74	395.11	561.95	710.91	801.76	890.10	1,023.14	1,389.05	1,589.83	1,704.64	1,810.37			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	214.24	370.17	468.00	565.82	668.12	781.55	890.52	1,022.50	1,156.59	1,277.09	1,379.53			
	2	0.00	228.54	357.66	455.48	553.31	664.54	769.04	891.41	1,032.33	1,161.95	1,277.98	1,380.42			
	3	0.00	192.52	323.60	441.27	601.85	715.06	857.03	1,030.29	1,382.79	1,502.23	1,576.82	1,651.25			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	133.79	231.61	342.85	436.20	525.09	593.83	649.16	754.32	870.54	991.04	1,115.83			
	2	0.00	120.11	224.38	368.87	522.29	648.91	790.88	950.73	1,229.93	1,358.31	1,459.71	1,547.56			
	3	0.00	124.58	215.44	350.99	477.60	604.21	710.43	812.18	929.58	1,035.61	1,163.83	1,296.37			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	1.49	5.45	22.83	147.47	321.28	470.47	561.56	715.89	917.02	1,086.68	1,239.18			
	2	0.00	2.38	9.03	15.68	95.62	256.92	392.70	506.14	664.93	858.02	1,033.05	1,207.90			
	3	0.00	4.17	8.14	13.89	67.02	164.84	264.87	360.43	492.41	667.62	801.53	886.09			

ตารางที่ ๒.๒

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมไฮโดรเจนไปคาร์บอนไดออกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	1,857.19	2,039.70	2,092.98	2,123.73	2,136.53	2,164.76	2,207.81	2,227.70	2,247.68	2,284.28	2,290.13	2,304.71		
	2	1,573.83	1,801.92	1,981.24	2,087.97	2,167.82	2,240.75	2,265.91	2,321.56	2,329.92	2,339.71	2,367.90	2,378.01		
	3	1,729.43	1,942.89	2,102.23	2,180.93	2,210.39	2,228.91	2,266.76	2,303.78	2,309.61	2,345.33	2,368.20	2,372.97		
FW/CFPP 80:20	1	1,855.41	1,944.05	2,001.80	2,037.02	2,058.76	2,113.81	2,147.91	2,163.34	2,174.38	2,179.70	2,181.07	2,182.24		
	2	1,927.81	1,998.58	2,042.92	2,087.08	2,135.64	2,190.69	2,229.26	2,249.15	2,260.20	2,269.98	2,271.36	2,277.00		
	3	1,918.05	1,960.77	1,986.02	1,997.68	2,027.14	2,059.07	2,074.57	2,107.12	2,121.89	2,126.32	2,131.31	2,131.61		
FW/CFPP 60:40	1	1,896.53	1,944.95	1,984.81	2,020.03	2,055.19	2,092.36	2,121.99	2,137.42	2,148.46	2,149.30	2,149.30	2,154.94		
	2	1,844.75	1,878.53	1,917.19	1,951.20	1,985.13	2,012.59	2,037.03	2,047.23	2,048.59	2,057.49	2,062.48	2,062.48		
	3	1,867.99	1,901.77	1,931.49	1,947.62	1,977.08	1,995.60	2,006.63	2,025.78	2,031.60	2,040.51	2,041.02	2,041.02		
FW/CFPP 40:60	1	1,455.83	1,553.41	1,660.32	1,776.00	1,851.38	1,906.42	1,927.12	1,938.07	1,944.65	1,958.90	1,960.28	1,965.92		
	2	1,474.60	1,599.00	1,679.10	1,732.20	1,762.88	1,791.11	1,811.80	1,822.76	1,842.74	1,852.53	1,853.90	1,859.54		
	3	1,708.87	1,778.41	1,839.42	1,877.90	1,902.89	1,921.41	1,927.97	1,933.70	1,939.53	1,943.96	1,957.89	1,957.89		
FW/CFPP 20:80	1	1,214.47	1,370.16	1,486.01	1,577.55	1,626.11	1,685.63	1,710.79	1,735.16	1,759.61	1,760.45	1,760.45	1,766.09		
	2	1,627.53	1,688.12	1,731.26	1,751.85	1,763.44	1,773.02	1,773.02	1,778.75	1,778.75	1,792.13	1,792.65	1,792.65		
	3	1,403.16	1,544.20	1,640.97	1,697.33	1,735.73	1,763.19	1,778.69	1,793.36	1,799.19	1,808.09	1,817.55	1,817.85		
FW/CFPP 0:100	1	1,369.12	1,556.99	1,672.84	1,748.29	1,796.85	1,811.67	1,823.42	1,834.38	1,840.96	1,843.59	1,843.59	1,843.59		
	2	1,346.77	1,534.64	1,641.55	1,699.12	1,729.80	1,758.03	1,778.73	1,789.69	1,789.69	1,795.00	1,796.38	1,797.55		
	3	953.45	1,105.57	1,221.41	1,368.37	1,483.98	1,579.25	1,640.17	1,682.42	1,702.40	1,712.18	1,718.03	1,737.08		

ภาคผนวก ข
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม
ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ ๗.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 1)

อัตราส่วน	การ ผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (ผลิตปริมาณต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
	วิเคราะห์ วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP	1														
100:0	0.00	56.91	16.55	14.82	15.87	16.58	18.34	20.27	20.64	26.00	23.46	23.42			
	2	0.00	59.77	20.10	13.93	9.46	10.25	15.63	12.88	17.45	22.12	23.33			
	3	0.00	62.45	22.76	11.25	16.77	12.95	13.31	17.25	21.55	21.22	22.10			
FW/CFPP	1														
80:20	0.00	56.91	27.20	29.06	32.96	26.36	27.34	25.67	28.89	20.65	10.38	10.25			
	2	0.00	60.49	27.20	23.72	27.56	28.14	30.03	30.93	26.44	13.52	7.96			
	3	0.00	56.13	25.99	26.59	28.52	29.11	21.80	29.35	26.38	18.15	6.94			
FW/CFPP	1														
60:40	0.00	51.73	34.30	32.62	34.76	24.58	25.54	29.54	32.87	22.79	10.47	9.72			
	2	0.00	45.89	36.79	32.62	24.64	19.03	20.27	38.33	24.46	9.60	9.17			
	3	0.00	45.04	33.19	32.62	26.19	19.03	27.45	37.43	21.36	12.27	11.41			
FW/CFPP	1														
40:60	0.00	43.50	31.64	20.16	20.37	21.03	23.74	19.49	15.31	14.33	13.07	11.04			
	2	0.00	46.36	26.31	20.16	20.37	21.94	21.81	16.28	13.88	12.62	11.04			
	3	0.00	37.36	26.89	23.14	28.21	30.11	35.53	36.09	13.05	8.26	8.28			
FW/CFPP	1														
20:80	0.00	27.41	20.10	22.83	19.47	18.36	14.74	10.22	12.39	12.55	13.07	13.23			
	2	0.00	23.54	21.49	28.31	26.97	30.11	32.84	28.72	13.96	10.94	9.62			
	3	0.00	24.39	18.79	26.59	22.31	22.73	21.17	12.47	11.68	13.61	14.08			
FW/CFPP	1														
0:100	0.00	0.95	1.45	4.13	25.76	35.26	30.93	16.40	17.73	21.01	18.00	15.96			
	2	0.00	1.13	1.99	1.99	16.77	28.23	20.27	18.22	20.21	18.53	18.15			
	3	0.00	1.49	1.45	1.82	11.37	20.14	17.18	15.31	18.43	14.41	9.28			

ตารางที่ ๓๑.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีผลิตรวมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	19.26	12.51	4.13	2.58	1.38	1.86	2.86	1.54	1.56	1.87	0.72	1.05		
	2	18.26	15.50	12.66	7.64	5.85	3.98	1.92	3.32	0.97	0.83	1.63	0.87		
	3	19.26	14.62	11.39	5.85	2.57	1.44	2.63	2.43	0.88	1.87	1.45	0.69		
FW/CFPP 80:20	1	9.64	6.34	4.44	2.87	1.98	3.13	2.39	1.32	1.11	0.65	0.53	0.51		
	2	8.28	5.17	3.53	3.47	3.77	3.13	2.63	1.54	1.11	0.83	0.53	0.69		
	3	7.67	3.39	2.26	1.34	2.51	2.19	1.32	2.20	1.30	0.66	0.66	0.49		
FW/CFPP 60:40	1	4.19	3.70	3.23	2.87	2.87	2.28	2.15	1.32	1.11	0.48	0.35	0.69		
	2	5.88	2.80	3.16	2.83	2.81	1.97	1.77	1.08	0.63	0.84	0.66	0.31		
	3	6.33	2.80	2.56	1.64	2.51	1.52	1.10	1.53	0.86	0.84	0.48	0.13		
FW/CFPP 40:60	1	8.28	6.93	7.76	8.24	5.55	3.13	1.68	1.09	0.88	1.00	0.53	0.69		
	2	10.09	8.69	5.95	4.07	2.57	1.86	1.68	1.09	1.56	0.83	0.53	0.69		
	3	6.33	5.16	4.66	3.13	2.22	1.52	0.87	0.86	0.86	0.66	1.01	0.06		
FW/CFPP 20:80	1	10.55	10.75	8.37	6.63	3.77	3.34	1.92	1.76	1.78	0.48	0.35	0.69		
	2	8.57	4.57	3.46	1.94	1.33	1.08	0.42	0.86	0.41	1.02	0.48	0.13		
	3	11.25	9.87	7.07	4.33	3.10	1.97	1.32	1.31	0.86	0.84	0.83	0.49		
FW/CFPP 0:100	1	13.72	12.86	8.37	5.56	3.77	1.23	1.20	1.09	0.88	0.55	0.24	0.08		
	2	14.63	12.86	7.76	4.36	2.57	1.86	1.68	1.09	0.44	0.65	0.53	0.51		
	3	7.37	10.51	8.37	10.32	8.24	5.04	3.81	2.65	1.56	0.83	0.72	1.22		

ตารางที่ ๓.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมโซลิดเมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1)

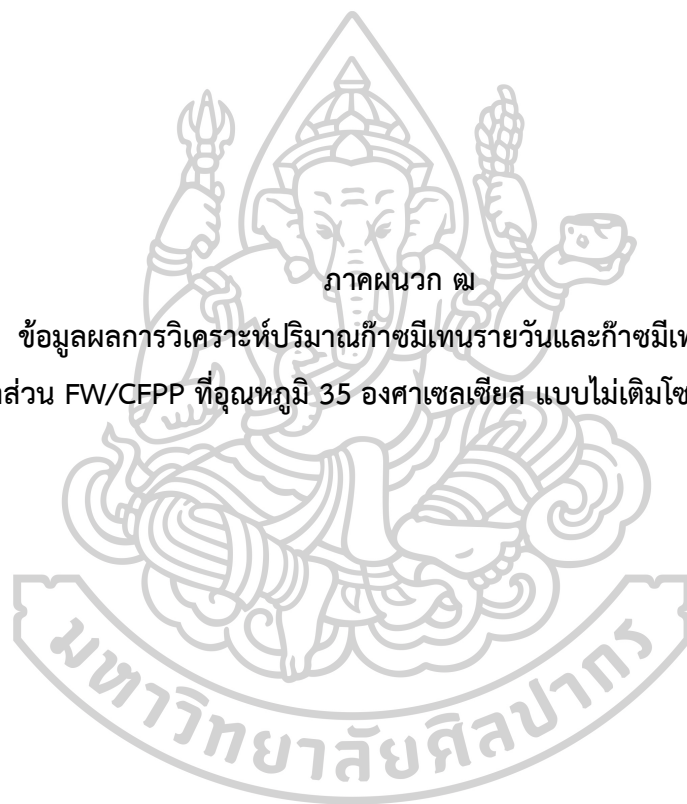
อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	56.91	73.58	88.46	104.23	120.89	139.12	162.71	200.67	252.87	299.70	347.40			
	2	0.00	59.77	80.01	94.00	104.41	113.92	124.10	142.33	165.99	201.03	245.17	292.69			
	3	0.00	62.43	85.55	97.05	113.91	127.20	140.23	155.95	187.98	231.57	274.25	319.59			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	56.91	84.30	113.49	146.24	172.74	199.91	229.75	282.91	324.39	345.11	365.99			
	2	0.00	60.49	87.88	111.70	139.09	167.38	197.22	229.93	286.84	339.94	366.92	383.15			
	3	0.00	58.85	84.65	112.24	145.20	170.10	191.18	219.42	277.91	329.54	365.96	379.84			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	51.73	86.27	119.03	153.57	178.28	203.66	237.98	298.46	344.23	365.13	384.94			
	2	0.00	48.13	84.65	118.50	146.98	168.32	186.71	206.90	283.27	331.15	350.41	368.76			
	3	0.00	47.23	80.18	114.03	144.30	162.95	181.35	208.69	283.27	325.07	349.69	372.51			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	43.50	75.37	95.61	115.85	136.98	160.57	183.27	211.40	240.18	266.26	288.76			
	2	0.00	46.36	72.86	93.10	113.35	136.27	158.07	183.45	213.36	241.25	266.44	288.93			
	3	0.00	39.19	65.88	89.90	122.49	145.61	174.74	210.12	282.02	307.55	324.13	340.69			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	27.41	47.65	70.58	89.92	108.38	123.03	135.00	157.76	182.97	209.05	236.01			
	2	0.00	24.70	46.04	75.41	106.58	132.38	161.51	194.21	251.45	278.77	300.71	319.95			
	3	0.00	25.60	44.25	71.84	97.64	123.44	145.42	166.50	191.38	214.23	241.53	269.71			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.95	2.42	6.57	32.18	67.62	98.36	117.48	150.07	192.27	228.18	260.69			
	2	0.00	1.13	3.14	5.14	21.81	54.74	82.80	106.39	139.88	180.47	217.46	254.43			
	3	0.00	1.49	2.96	4.79	16.09	36.33	57.24	77.25	105.38	142.39	171.15	190.07			

ตารางที่ ๓.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมโซลิดเมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	385.33	423.42	435.64	443.36	447.50	455.42	466.16	472.35	478.55	488.20	491.64	496.86		
	2	328.66	375.87	413.29	436.21	453.76	470.61	477.78	491.12	495.00	499.28	507.20	511.52		
	3	357.45	401.85	435.40	452.83	460.43	466.48	476.26	485.95	489.39	498.95	505.89	509.22		
FW/CFPP 80:20	1	384.97	404.30	417.40	426.02	431.95	445.23	454.18	459.48	463.89	467.28	469.83	472.36		
	2	399.45	415.20	425.62	436.03	447.32	460.60	470.45	476.64	481.05	485.34	487.89	491.31		
	3	395.17	405.43	412.16	416.18	423.78	432.51	437.82	446.61	451.85	455.15	458.51	460.95		
FW/CFPP 60:40	1	393.20	404.47	414.00	422.62	431.23	440.94	449.00	454.29	458.70	461.20	462.86	466.28		
	2	380.51	388.98	398.39	406.89	415.38	423.22	430.31	434.64	437.19	441.38	444.74	446.29		
	3	385.16	393.63	401.25	406.17	413.77	419.82	424.23	430.35	433.79	437.99	440.45	441.11		
FW/CFPP 40:60	1	305.06	326.17	349.10	373.81	390.47	403.75	410.02	414.42	417.94	423.12	425.67	429.10		
	2	308.81	335.29	352.86	365.05	372.77	380.69	386.96	391.36	397.56	401.85	404.40	407.82		
	3	353.33	368.96	382.84	392.23	398.93	404.98	408.50	411.93	415.37	418.68	423.83	424.12		
FW/CFPP 20:80	1	256.79	289.52	314.24	334.12	345.42	359.59	366.76	373.84	380.93	383.43	385.09	388.51		
	2	337.07	350.90	361.20	367.02	371.04	375.30	377.03	380.47	382.12	387.21	389.68	390.33		
	3	292.19	322.12	343.15	356.11	365.50	373.34	378.64	383.86	387.31	391.50	395.76	398.20		
FW/CFPP 0:100	1	287.71	326.88	351.61	368.27	379.56	384.80	389.28	393.69	397.20	400.06	401.18	401.57		
	2	283.24	322.41	345.35	358.44	366.15	374.07	380.34	384.75	386.48	389.87	392.42	394.95		
	3	204.58	236.60	261.32	292.29	316.99	338.32	352.63	363.29	369.49	373.78	377.22	383.33		

ภาคผนวก ต
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม
ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ ผ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุมและชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)															
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15				
Control	1	0.00	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
	2	0.00	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
	3	0.00	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
FW/CFPP 100:0	1	0.00	197.60	61.75	46.77	25.19	11.52	8.31	5.59	2.40	1.05	0.96	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
	2	0.00	207.58	56.77	56.72	34.51	16.75	11.08	7.83	2.88	1.05	0.96	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
FW/CFPP 80:20	1	0.00	252.50	61.75	36.82	15.86	14.66	6.46	6.71	2.40	1.05	0.96	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
	2	0.00	217.56	66.73	31.84	25.19	12.57	10.16	8.95	2.88	3.14	0.96	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
	3	0.00	212.57	61.75	41.79	20.52	14.66	6.46	6.71	0.96	1.05	0.96	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
FW/CFPP 60:40	1	0.00	262.48	71.71	56.72	34.51	12.57	22.16	11.19	8.63	8.37	8.67	8.65	8.65	8.65	8.65	8.65
	2	0.00	282.44	76.69	41.79	34.51	23.04	22.16	24.61	20.14	19.35	37.11	46.80	46.80	46.80	46.80	46.80
FW/CFPP 40:60	1	0.00	282.44	96.61	81.59	62.50	80.63	66.48	69.35	65.71	108.79	107.47	74.77	74.77	74.77	74.77	74.77
	2	0.00	277.45	101.59	76.62	67.16	59.69	84.95	69.35	80.10	132.32	124.34	82.40	82.40	82.40	82.40	82.40
	3	0.00	287.43	91.63	76.62	62.50	59.69	84.95	86.13	75.30	114.02	124.34	77.31	77.31	77.31	77.31	77.31
FW/CFPP 20:80	1	0.00	152.69	96.61	91.54	109.14	96.34	80.33	74.94	60.91	71.65	53.98	44.25	44.25	44.25	44.25	44.25
	2	0.00	151.70	56.77	76.62	95.15	75.39	66.48	46.98	41.73	40.27	39.52	54.43	54.43	54.43	54.43	54.43
	3	0.00	167.66	61.75	106.47	109.14	96.34	75.72	69.35	51.32	55.96	41.93	46.80	46.80	46.80	46.80	46.80
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.40	0.40	21.89	39.18	54.45	57.25	74.94	58.51	55.96	41.93	36.62	36.62	36.62	36.62	36.62
	2	0.00	0.10	0.10	5.97	43.84	80.63	103.42	102.91	48.92	40.27	41.93	31.54	31.54	31.54	31.54	31.54
	3	0.00	0.30	0.30	13.93	20.52	33.51	57.25	58.17	39.33	29.81	46.75	46.80	46.80	46.80	46.80	46.80

ตารางที่ ผ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุมและชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
Control	1	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	7.98	7.98	7.98
	2	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	7.45	7.45	7.45
	3	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	6.52	6.52	6.52
FW/CFPP 100:0	1	0.94	0.69	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
	2	0.94	0.69	0.66	0.33	0.34	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	7.58	49.90	24.15
FW/CFPP 80:20	1	0.47	0.69	0.66	0.99	3.07	15.57	47.91	36.43	5.53	12.37	6.44	13.26	12.37	6.44	13.26
	2	0.94	0.69	0.66	0.33	0.68	2.76	14.65	37.17	43.02	18.76	12.47	11.28	18.76	12.47	11.28
	3	0.94	0.35	0.33	0.33	0.68	9.29	48.66	44.36	11.57	11.57	8.45	5.34	11.57	8.45	5.34
FW/CFPP 60:40	1	19.76	61.61	82.11	64.32	41.68	77.35	71.75	61.71	34.97	25.14	12.47	13.26	25.14	12.47	13.26
	2	83.76	70.27	50.86	52.06	74.48	64.79	42.95	42.63	28.68	25.14	14.49	10.29	25.14	14.49	10.29
FW/CFPP 40:60	1	48.00	31.84	38.90	35.48	41.68	30.64	21.10	23.30	11.57	13.57	6.44	6.33	13.57	6.44	6.33
	2	66.82	45.69	36.57	32.82	22.89	24.36	18.62	20.82	10.57	8.38	6.44	7.32	8.38	6.44	7.32
	3	62.12	37.04	36.57	32.82	24.60	20.59	17.87	20.32	14.59	12.17	11.47	8.31	12.17	11.47	8.31
FW/CFPP 20:80	1	45.65	37.04	29.26	21.88	21.18	28.13	33.76	31.97	23.65	19.96	11.47	10.29	19.96	11.47	10.29
	2	38.59	43.96	35.90	31.83	29.72	26.87	23.58	28.25	18.62	18.96	17.51	16.23	18.96	17.51	16.23
	3	40.94	42.23	35.90	31.83	34.85	30.64	24.58	27.26	26.67	17.56	12.47	12.27	17.56	12.47	12.27
FW/CFPP 0:100	1	38.59	37.04	35.24	29.18	29.72	26.87	21.10	24.54	21.89	25.54	21.53	24.15	25.54	21.53	24.15
	2	36.24	31.84	28.26	22.88	26.31	20.59	22.10	26.02	25.66	25.34	17.51	22.17	25.34	17.51	22.17
	3	38.59	37.04	35.24	29.18	29.72	26.87	21.10	24.54	21.89	25.54	21.53	24.15	25.54	21.53	24.15

ตารางที่ ผ.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไนโตรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	196.56	60.71	45.73	24.15	10.48	7.27	4.55	1.36	0.01	0.00	0.00			
	2	0.00	206.54	55.73	55.68	33.47	15.71	10.04	6.79	1.84	0.01	1.85	0.00			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	251.45	60.71	35.78	14.82	13.62	5.42	5.67	1.36	0.01	0.00	0.00			
	2	0.00	216.52	65.69	30.80	24.15	11.52	9.12	7.91	1.84	2.10	0.00	0.00			
	3	0.00	211.53	60.71	40.75	19.48	13.62	5.42	5.67	0.00	0.01	0.00	0.00			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	261.43	70.67	55.68	33.47	11.52	21.12	10.14	7.59	7.33	7.63	7.61			
	2	0.00	281.39	75.65	40.75	33.47	22.00	21.12	23.57	19.10	18.31	36.07	45.75			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	281.39	95.57	80.55	61.46	79.59	65.44	68.31	64.67	107.75	106.43	73.73			
	2	0.00	276.40	100.55	75.58	66.12	58.65	83.91	68.31	79.06	131.28	123.30	81.36			
	3	0.00	286.38	90.59	75.58	61.46	58.65	83.91	85.09	74.26	112.98	123.30	76.27			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	151.65	95.57	90.50	108.10	95.29	79.29	73.90	59.87	70.61	52.94	43.21			
	2	0.00	150.66	55.73	75.58	94.11	74.35	65.44	45.94	40.69	39.23	38.48	53.38			
	3	0.00	166.62	60.71	105.43	108.10	95.29	74.67	68.31	50.28	54.92	40.89	45.75			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.00	0.00	20.85	38.14	53.41	56.21	73.90	57.47	54.92	40.89	35.58			
	2	0.00	0.00	0.00	4.93	42.80	79.59	102.38	101.87	47.88	39.23	40.89	30.50			
	3	0.00	0.00	0.00	12.89	19.48	32.47	56.21	57.12	38.29	28.77	45.71	45.75			

ตารางที่ ผ.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไนโตรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FW/CFPP 80:20	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.53	42.88	31.40	0.50	5.06	0.00	0.00	5.94	
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.61	32.14	37.98	11.44	5.16	3.97	0.00	
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.26	43.62	39.33	6.54	4.26	1.13	0.00	0.00	
FW/CFPP 60:40	1	14.49	56.34	76.84	59.05	36.41	72.31	66.71	56.67	29.93	17.83	5.16	5.94	5.94		
	2	78.49	64.99	45.59	46.78	69.20	59.76	37.91	37.59	23.64	17.83	7.17	2.98	2.98		
FW/CFPP 40:60	1	42.72	26.57	33.62	30.20	36.41	25.60	16.07	18.26	6.54	6.25	0.00	0.00	0.00		
	2	61.55	40.42	31.29	27.55	17.62	19.32	13.58	15.78	5.53	1.06	0.00	0.01	0.01		
	3	56.84	31.76	31.29	27.55	19.32	15.56	12.84	15.29	9.56	4.86	4.15	1.00	1.00		
FW/CFPP 20:80	1	40.37	31.76	23.98	16.61	15.91	23.09	28.73	26.93	18.61	12.64	4.15	2.98	2.98		
	2	33.31	38.68	30.63	26.56	24.45	21.84	18.55	23.22	13.58	11.64	10.19	8.91	8.91		
	3	35.67	36.95	30.63	26.56	29.57	25.60	19.54	22.23	21.63	10.24	5.16	4.96	4.96		
FW/CFPP 0:100	1	33.31	31.76	29.96	23.90	24.45	21.84	16.07	19.50	16.85	18.23	14.21	16.83	16.83		
	2	30.96	26.57	22.98	17.60	21.03	15.56	17.06	20.99	20.63	18.03	10.19	14.85	14.85		
	3	42.72	38.68	30.30	25.23	32.99	26.86	26.00	28.17	25.91	22.02	19.24	17.82	17.82		

ตารางที่ ผ.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (การทดลองที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	196.96	257.92	303.88	329.84	339.80	339.80	339.80	342.63	342.64	342.64	342.64	342.64		
	2	0.00	206.96	262.92	318.88	354.84	369.80	380.76	380.76	384.59	384.60	388.44	388.44	388.44		
FW/CFPP 80:20	1	0.00	251.96	312.92	348.88	364.84	377.80	377.80	377.80	380.63	380.64	380.64	380.64			
	2	0.00	216.96	282.92	313.88	339.84	350.80	360.76	360.76	364.59	368.60	368.60	368.60			
	3	0.00	211.96	272.92	313.88	334.84	347.80	347.80	347.80	347.80	347.81	347.81	347.81			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	261.96	332.92	388.88	424.84	435.80	458.76	458.76	474.59	488.60	504.44	519.39			
	2	0.00	281.96	357.92	398.88	434.84	455.80	478.76	499.71	539.54	574.55	649.40	739.35			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	281.96	377.92	458.88	524.84	600.80	671.76	732.71	867.54	1,073.55	1,294.40	1,439.35			
	2	0.00	276.96	377.92	453.88	524.84	580.80	671.76	732.71	897.54	1,148.55	1,404.40	1,564.35			
	3	0.00	286.96	377.92	453.88	519.84	575.80	666.76	742.71	897.54	1,113.55	1,369.40	1,519.35			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	151.96	247.92	338.88	454.84	545.80	631.76	697.71	822.54	957.55	1,067.40	1,152.35			
	2	0.00	150.96	206.92	282.88	383.84	454.80	525.76	566.71	651.54	726.55	806.40	911.35			
	3	0.00	166.96	227.92	333.88	449.84	540.80	621.76	682.71	787.54	892.55	977.40	1,067.35			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.00	0.00	20.96	61.92	112.88	173.84	239.80	359.63	464.64	549.48	619.43			
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	45.96	121.92	232.88	323.84	423.67	498.68	583.52	643.47			
	3	0.00	0.00	0.00	12.96	33.92	64.88	125.84	176.80	256.63	311.64	406.48	496.43			

ภาคผนวก ณ
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม
ของอัตราส่วน FW/CFPP ที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ ณ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	175.71	54.27	40.87	21.58	9.37	6.50	4.07	1.21	0.00	0.00	0.00			
	2	0.00	184.63	49.82	49.77	29.92	14.05	8.97	6.07	1.64	0.00	1.65	0.00			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	224.78	54.27	31.98	13.25	12.17	4.85	5.07	1.21	0.00	0.00	0.00			
	2	0.00	193.55	58.72	27.53	21.58	10.30	8.15	7.07	1.64	1.87	0.00	0.00			
	3	0.00	189.09	54.27	36.43	17.41	12.17	4.85	5.07	0.00	0.00	0.00	0.00			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	233.70	63.17	49.77	29.92	10.30	18.88	9.07	6.79	6.55	6.82	6.80			
	2	0.00	251.54	67.63	36.43	29.92	19.66	18.88	21.07	17.08	16.37	32.24	40.90			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	251.54	85.43	72.01	54.94	71.14	58.50	61.06	57.81	96.31	95.14	65.91			
	2	0.00	247.08	89.89	67.56	59.11	52.42	75.01	61.06	70.67	117.35	110.22	72.73			
	3	0.00	256.00	80.98	67.56	54.94	52.42	75.01	76.06	66.38	100.99	110.22	68.18			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	135.56	85.43	80.90	96.63	85.18	70.88	66.06	53.52	63.12	47.32	38.63			
	2	0.00	134.67	49.82	67.56	84.12	66.46	58.50	41.07	36.37	35.07	34.40	47.72			
	3	0.00	148.95	54.27	94.24	96.63	85.18	66.75	61.06	44.94	49.09	36.55	40.90			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.00	0.00	18.64	34.09	47.74	50.24	66.06	51.38	49.09	36.55	31.81			
	2	0.00	0.00	0.00	4.41	38.26	71.14	91.51	91.06	42.80	35.07	36.55	27.26			
	3	0.00	0.00	0.00	11.52	17.41	29.02	50.24	51.06	34.23	25.72	40.86	40.90			

ตารางที่ ณ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	38.06	15.05	
FW/CFPP 80:20	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.42	38.33	28.07	0.45	4.52	0.00	0.00	0.00	5.31	
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.59	28.73	33.95	10.23	4.61	3.54	4.61	3.54	
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.80	39.00	35.15	5.84	3.81	1.01	0.00	1.01	0.00	
FW/CFPP 60:40	1	12.95	50.36	68.69	52.78	32.54	64.64	59.63	50.66	26.76	15.94	4.61	5.31	4.61	5.31	
	2	70.16	58.10	40.75	41.82	61.86	53.42	33.89	33.60	21.14	15.94	6.41	2.66	6.41	2.66	
FW/CFPP 40:60	1	38.19	23.75	30.05	27.00	32.54	22.89	14.36	16.32	5.84	5.59	0.00	0.00	0.00	0.00	
	2	55.02	36.13	27.97	24.63	15.75	17.27	12.14	14.11	4.94	0.95	0.00	0.01	0.00	0.01	
	3	50.81	28.39	27.97	24.63	17.27	13.91	11.48	13.67	8.54	4.34	3.71	0.89	3.71	0.89	
FW/CFPP 20:80	1	36.09	28.39	21.44	14.85	14.22	20.64	25.68	24.08	16.64	11.30	3.71	2.66	3.71	2.66	
	2	29.78	34.58	27.38	23.74	21.85	19.52	16.58	20.75	12.14	10.41	9.11	7.97	9.11	7.97	
	3	31.88	33.03	27.38	23.74	26.44	22.89	17.47	19.87	19.34	9.16	4.61	4.43	4.61	4.43	
FW/CFPP 0:100	1	29.78	28.39	26.79	21.37	21.85	19.52	14.36	17.43	15.06	16.29	12.70	15.05	12.70	15.05	
	2	27.68	23.75	20.54	15.74	18.80	13.91	15.25	18.76	18.44	16.11	9.11	13.28	16.11	9.11	13.28
	3	38.19	34.58	27.08	22.55	29.49	24.01	23.24	25.19	23.16	19.68	17.20	15.93	19.68	17.20	15.93

ตารางที่ ณ.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน แบบไม่เติมไฮเดรียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	176.06	230.56	271.64	294.84	303.75	303.75	303.75	306.28	306.29	306.29	306.29	306.29		
	2	0.00	185.00	235.03	285.05	317.19	330.56	340.36	340.36	343.78	343.79	347.23	347.23	347.23		
FW/CFPP 80:20	1	0.00	225.23	279.72	311.86	326.13	337.72	337.72	340.25	340.25	340.25	340.25	340.25			
	2	0.00	193.94	252.90	280.58	303.78	313.58	322.48	322.48	325.91	329.49	329.49	329.49			
	3	0.00	189.47	243.96	280.58	299.31	310.90	310.90	310.90	310.90	310.91	310.91	310.91			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	234.17	297.60	347.62	379.77	389.56	410.09	410.09	424.24	436.76	450.92	464.29			
	2	0.00	252.05	319.95	356.56	388.70	407.44	427.96	446.70	482.30	513.60	580.50	660.91			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	252.05	337.82	410.19	469.16	537.06	600.49	654.98	775.51	959.66	1,157.07	1,286.65			
	2	0.00	247.58	337.82	405.73	469.16	519.18	600.49	654.98	802.32	1,026.70	1,255.40	1,398.39			
	3	0.00	256.52	337.82	405.73	464.69	514.71	596.02	663.92	802.32	995.42	1,224.11	1,358.16			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	135.84	221.62	302.93	406.58	487.89	564.73	623.69	735.28	855.97	954.15	1,030.10			
	2	0.00	134.94	184.97	252.87	343.12	406.55	469.98	506.59	582.42	649.47	720.84	814.66			
	3	0.00	149.25	203.74	298.46	402.11	483.42	555.79	610.28	703.99	797.86	873.70	954.11			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.00	0.00	18.74	55.35	100.90	155.39	214.36	321.47	415.34	491.18	553.71			
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	41.08	108.98	208.17	289.48	378.72	445.77	521.61	575.20			
	3	0.00	0.00	0.00	11.58	30.32	57.99	112.49	158.04	229.40	278.57	363.35	443.76			



ตารางที่ ด.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน แบบไม่เติมไฮโดรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรมาตามลำดับของแข็งระเหยง่าย)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	25.71	17.39	8.27	4.41	1.97	1.39	0.91	0.34	0.09	0.08	0.09			
	2	0.00	27.01	15.98	10.05	6.08	2.90	1.89	1.31	0.42	0.09	0.42	0.09			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	32.87	17.39	6.49	2.74	2.53	1.06	1.11	0.34	0.09	0.08	0.09			
	2	0.00	28.31	18.80	5.60	4.41	2.15	1.72	1.51	0.42	0.47	0.08	0.09			
	3	0.00	27.66	17.39	7.38	3.58	2.53	1.06	1.11	0.08	0.09	0.08	0.00			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	34.18	20.21	10.05	6.08	2.15	3.87	1.91	1.45	1.40	1.46	1.45			
	2	0.00	36.78	21.62	7.38	6.08	4.03	3.87	4.31	3.51	3.37	6.54	8.27			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	36.78	27.26	14.49	11.08	14.32	11.79	12.31	11.65	19.36	19.12	13.27			
	2	0.00	36.13	28.67	13.60	11.91	10.58	15.09	12.31	14.23	23.56	22.14	14.64			
	3	0.00	37.44	25.85	13.60	11.08	10.58	15.09	15.31	13.37	20.29	22.14	13.73			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	19.84	27.26	16.27	19.42	17.13	14.27	13.31	10.80	12.72	9.56	7.82			
	2	0.00	19.71	15.98	13.60	16.92	13.39	11.79	8.31	7.37	7.11	6.97	9.64			
	3	0.00	21.80	17.39	18.94	19.42	17.13	13.44	12.31	9.08	9.91	7.40	8.27			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.00	0.02	3.82	6.91	9.64	10.14	13.31	10.37	9.91	7.40	6.45			
	2	0.00	0.00	0.00	0.97	7.75	14.32	18.40	18.31	8.65	7.11	7.40	5.55			
	3	0.00	0.00	0.00	2.40	3.58	5.90	10.14	10.31	6.94	5.24	8.26	8.27			

ตารางที่ ด.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่มีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมไนโตรเจนไปคาร์บอนเขต (การทดลองที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่มีเทนรายวันที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีผลิตภัณฑ์มาตรฐานต่อกรัมแห้ง)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	3.66
FW/CFPP 80:20	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	2.33	8.12	6.06	0.54	1.56	0.50	1.72		
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	2.17	6.20	7.24	2.70	1.58	1.36		
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	8.25	7.48	1.62	1.42	0.86	0.30		
FW/CFPP 60:40	1	3.06	10.54	14.21	11.03	6.98	13.38	12.38	10.58	5.80	3.84	1.58	1.72		
	2	14.50	12.09	8.62	8.84	12.84	11.13	7.23	7.17	4.68	3.84	1.94	1.19		
FW/CFPP 40:60	1	8.11	5.22	6.48	5.87	6.98	5.03	3.32	3.71	1.62	1.77	0.50	0.48		
	2	11.48	7.70	6.07	5.40	3.62	3.90	2.88	3.27	1.44	0.84	0.50	0.66		
	3	10.63	6.15	6.07	5.40	3.93	3.23	2.75	3.18	2.16	1.52	1.40	0.83		
FW/CFPP 20:80	1	7.69	6.15	4.76	3.44	3.32	4.58	5.59	5.27	3.78	2.91	1.40	1.19		
	2	6.43	7.39	5.95	5.22	4.84	4.35	3.77	4.60	2.88	2.74	2.48	2.25		
	3	6.85	7.08	5.95	5.22	5.76	5.03	3.94	4.42	4.32	2.49	1.58	1.54		
FW/CFPP 0:100	1	6.43	6.15	5.83	4.74	4.84	4.35	3.32	3.94	3.46	3.91	3.19	3.66		
	2	6.01	5.22	4.58	3.62	4.23	3.23	3.50	4.20	4.14	3.88	2.48	3.31		
	3	8.11	7.39	5.89	4.98	6.37	5.25	5.10	5.49	5.08	4.59	4.09	3.84		

ตารางที่ ด.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ลภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองที่ 1)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริตรวมฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
FW/CFPP 100:0	1	0.00	35.31	46.30	54.61	59.34	61.21	62.73	62.73	63.43	63.61	63.77	63.95			
	2	0.00	37.09	47.19	57.29	63.81	66.58	68.63	69.79	70.67	70.85	71.73	71.90			
FW/CFPP 80:20	1	0.00	45.14	56.13	62.65	65.60	68.01	69.17	70.15	70.85	71.03	71.19	71.37			
	2	0.00	38.88	50.77	56.39	61.13	63.18	65.05	66.39	67.27	68.17	68.33	68.50			
	3	0.00	37.99	48.98	56.39	60.23	62.64	63.80	64.78	64.95	65.13	65.29	65.29			
FW/CFPP 60:40	1	0.00	46.93	59.71	69.80	76.33	78.38	82.58	84.27	87.29	89.98	93.00	95.86			
	2	0.00	50.50	64.18	71.59	78.11	81.95	86.15	89.99	97.31	103.74	117.32	133.58			
FW/CFPP 40:60	1	0.00	50.50	67.75	82.32	94.20	107.88	120.66	131.65	155.95	192.96	232.63	258.73			
	2	0.00	49.61	67.75	81.42	94.20	104.30	120.66	131.65	161.31	206.36	252.30	281.08			
	3	0.00	51.40	67.75	81.42	93.31	103.41	119.76	133.44	161.31	200.11	246.04	273.03			
FW/CFPP 20:80	1	0.00	27.26	44.51	60.86	81.69	98.04	113.50	125.39	147.90	172.22	192.05	207.42			
	2	0.00	27.08	37.18	50.85	69.00	81.77	94.55	101.97	117.33	130.92	145.38	164.33			
	3	0.00	29.94	40.93	59.97	80.79	97.15	111.72	122.71	141.64	160.60	175.96	192.22			
FW/CFPP 0:100	1	0.00	0.00	0.00	3.84	11.26	20.46	31.45	43.34	64.95	83.91	99.27	111.96			
	2	0.00	0.00	0.00	0.98	9.29	22.96	42.89	59.25	77.29	90.88	106.24	117.14			
	3	0.00	0.00	0.00	2.41	6.25	11.88	22.87	32.07	46.54	56.55	73.70	89.97			

ตารางที่ ด.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองที่ 1) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
FW/CFPP 100:0	1	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	63.95	
	2	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	71.90	
FW/CFPP 80:20	1	71.37	71.37	71.37	71.37	71.59	80.89	113.58	138.04	140.19	147.99	150.46	159.14		
	2	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.68	77.41	102.41	131.20	144.73	152.56	159.44		
	3	65.29	65.29	65.29	65.29	65.29	70.11	103.34	133.52	139.96	147.05	151.31	152.83		
FW/CFPP 60:40	1	102.37	132.83	175.57	208.83	229.26	282.53	332.39	375.09	398.15	417.40	425.23	433.90		
	2	164.40	199.33	225.27	251.91	289.51	333.84	362.96	391.89	410.48	429.73	439.35	445.35		
FW/CFPP 40:60	1	275.96	291.05	310.55	328.25	348.69	368.70	382.09	397.08	403.51	412.39	414.86	417.28		
	2	305.46	327.70	345.95	362.22	372.82	388.37	399.97	413.17	418.89	423.12	425.59	428.90		
	3	295.63	313.40	331.64	347.92	359.41	372.28	383.34	396.18	404.76	412.39	419.33	423.54		
FW/CFPP 20:80	1	223.76	241.53	255.84	266.22	275.92	294.15	316.65	337.90	352.92	367.52	374.46	380.45		
	2	177.99	199.33	217.22	232.96	247.14	264.47	279.65	298.21	309.65	323.36	335.66	347.02		
	3	206.77	227.22	245.11	260.85	277.71	297.73	313.61	331.46	348.63	361.08	368.91	376.69		
FW/CFPP 0:100	1	125.61	143.38	160.91	175.22	189.40	206.74	220.12	236.00	249.77	269.37	285.25	303.76		
	2	129.90	144.99	158.77	169.68	182.07	194.94	209.03	225.99	242.44	261.86	274.17	290.89		
	3	107.20	128.54	146.25	161.28	179.92	200.84	221.37	243.51	263.71	286.72	307.06	326.46		



ภาคผนวก ต

ข้อมูลผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ควบคุมกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ
ของอัตราส่วน I/S แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต

ตารางที่ ต.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช แบบเติมโซเดียมไฮคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	ค่าพีเอช							
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
I/S 0.5:1	8.18	6.71	6.61	6.49	6.79	7.27	7.10	7.22
I/S 1:1	8.22	6.77	6.77	7.01	7.25	7.22	7.23	7.48
I/S 1.5:1	8.09	6.92	7.08	7.06	7.26	7.20	7.32	7.48
I/S 2:1	7.20	6.89	6.99	7.39	7.36	7.36	7.42	7.30
I/S 2.5:1	8.01	7.04	7.06	7.11	7.23	7.21	7.50	7.49
หมายเหตุ. I/S 0.5:1	คือ อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์น้ำหนัก 2.5 กรัมของแข็งระเหยง่าย และวัสดุตั้งต้นน้ำหนัก 5 กรัมของแข็งระเหยง่าย							
I/S 1:1	คือ อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์น้ำหนัก 5 กรัมของแข็งระเหยง่าย และวัสดุตั้งต้นน้ำหนัก 5 กรัมของแข็งระเหยง่าย							
I/S 1.5:1	คือ อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์น้ำหนัก 7.5 กรัมของแข็งระเหยง่าย และวัสดุตั้งต้นน้ำหนัก 5 กรัมของแข็งระเหยง่าย							
I/S 2:1	คือ อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์น้ำหนัก 10 กรัมของแข็งระเหยง่าย และวัสดุตั้งต้นน้ำหนัก 5 กรัมของแข็งระเหยง่าย							
I/S 2.5:1	คือ อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์น้ำหนัก 12.5 กรัมของแข็งระเหยง่าย และวัสดุตั้งต้นน้ำหนัก 5 กรัมของแข็งระเหยง่าย							

ตารางที่ ต.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการโตขึ้นระยะหาย แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	การโตขึ้นระยะหาย (มิลลิกรัมการต่อชดิกต่อชดิก)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	276.75	3,446.15	4,517.83	4,872.98	3,910.93	855.52	129.67	161.68		
	2	291.34	3,431.97	4,401.57	5,351.95	3,655.86	940.54	127.62	139.35		
I/S 1:1	1	310.10	2,800.83	664.42	1,430.31	680.15	109.20	84.50	83.55		
	2	339.29	2,963.93	722.55	1,446.28	637.63	121.95	96.82	96.95		
I/S 1.5:1	1	341.37	1,828.67	318.48	988.22	284.80	107.07	94.77	70.16		
	2	345.54	1,849.94	353.90	996.20	408.08	66.69	113.25	85.78		
I/S 2:1	1	767.72	2,297.53	869.95	420.21	43.42	115.85	139.66	93.41		
	2	763.55	2,255.88	841.85	265.61	93.09	124.04	97.10	95.53		
I/S 2.5:1	1	408.08	488.38	671.13	497.28	206.17	64.56	111.19	103.64		
	2	414.34	530.93	710.37	463.35	197.67	85.82	115.30	99.18		

ตารางที่ ต.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของปริมาณความแตกต่างแบบเติมโพเทียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ความแตกต่าง (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	3,602.94	3,663.83	3,925.95	3,954.16	4,150.38	5,469.26	5,455.75	5,623.99		
	2	3,595.03	3,678.67	3,859.41	3,706.52	3,966.80	5,504.66	5,446.09	5,633.59		
I/S 1:1	1	3,523.92	3,827.00	3,977.71	4,473.39	4,788.90	5,796.71	5,793.72	6,027.07		
	2	3,516.02	3,789.92	3,970.31	4,537.29	4,812.84	5,779.01	5,842.00	6,017.48		
I/S 1.5:1	1	3,405.41	4,071.75	4,532.22	4,553.27	4,836.78	5,938.31	6,141.34	6,238.21		
	2	3,413.31	4,049.50	4,539.61	4,593.21	4,836.78	5,991.40	6,170.31	6,238.21		
I/S 2:1	1	4,139.04	4,608.41	5,453.98	5,935.30	6,109.54	5,379.51	5,651.62	5,879.74		
	2	4,157.69	4,646.18	5,413.73	5,935.30	6,082.50	5,371.57	5,681.29	5,879.74		
I/S 2.5:1	1	3,776.76	4,353.58	4,635.73	4,936.70	5,076.23	6,336.55	6,653.12	6,881.23		
	2	3,784.66	4,353.58	4,672.70	4,952.68	5,052.28	6,345.40	6,682.09	6,862.04		

ตารางที่ ต.4

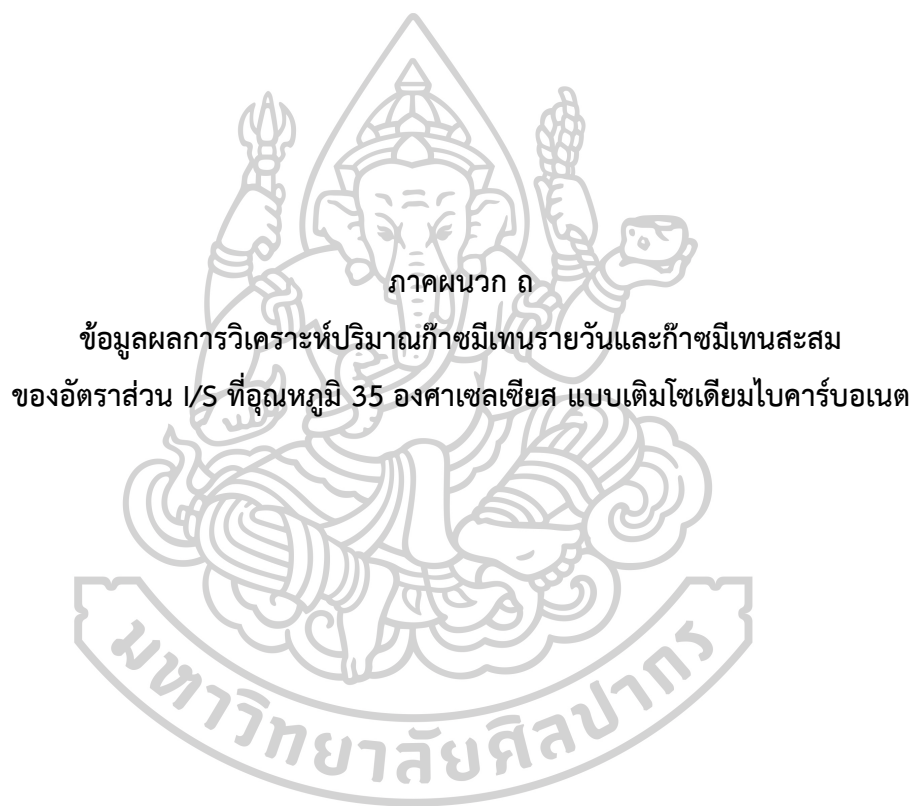
ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด แบบเดิมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	21.57	227.39	302.76	315.37	325.17	418.16	385.28	425.25		
	2	18.25	227.39	312.08	328.79	335.22	418.16	381.23	413.16		
I/S 1:1	1	34.84	242.97	277.92	332.15	348.63	433.03	466.39	517.96		
	2	38.16	242.97	277.92	328.79	341.93	447.90	470.45	526.03		
I/S 1.5:1	1	48.12	236.74	324.50	335.50	341.93	477.63	567.78	602.61		
	2	51.44	236.74	330.71	328.79	338.57	481.35	563.73	602.61		
I/S 2:1	1	93.97	291.52	388.82	478.03	488.22	486.54	538.91	606.12		
	2	93.97	299.45	380.37	467.41	480.65	486.54	554.48	609.58		
I/S 2.5:1	1	77.98	221.16	336.92	365.70	402.27	570.56	713.79	759.81		
	2	77.98	233.62	340.03	365.70	408.97	574.27	697.56	751.75		

ตารางที่ ต.5

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของปริมาณซีโอไลท์ละลาย แบบเติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ซีโอไลท์ละลาย (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	3,531.33	5,048.33	7,517.56	8,805.82	7,819.45	1,882.23	541.96	644.34		
	2	3,482.13	5,180.57	8,039.69	8,673.13	7,753.71	1,882.23	548.63	644.34		
I/S 1:1	1	3,547.72	3,792.06	6,208.27	3,398.55	1,198.82	679.41	344.89	365.13		
	2	3,531.33	3,593.70	6,273.53	3,133.17	1,083.78	672.83	347.56	367.71		
I/S 1.5:1	1	3,482.13	7,914.71	3,536.26	2,628.13	1,248.33	389.62	358.23	310.84		
	2	3,514.93	8,377.55	3,568.89	2,628.13	1,235.18	376.45	358.23	308.25		
I/S 2:1	1	3,510.35	3,957.36	2,692.73	1,237.12	697.30	415.23	456.01	439.31		
	2	3,774.29	4,188.78	2,890.90	1,193.66	703.88	415.23	450.76	444.65		
I/S 2.5:1	1	3,531.33	5,732.76	2,818.32	1,367.54	832.30	518.80	502.35	504.73		
	2	3,662.51	6,261.72	2,818.32	1,367.54	839.61	518.80	494.34	496.98		



ตารางที่ ๓.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตรังสีที่ก่อกำเนิดขึ้นจากชุดควบคุมแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเดิมโอดีเมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณกัมมันตรังสีรายวัน (มิลลิซีกรี)												
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60	
Control I/S 0.5:1	1	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.80	0.80	0.80
	2	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.80	0.80	0.80
	3	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.73	0.73	0.73
Control I/S 1:1	1	3.73	3.73	3.73	3.73	3.73	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.47	2.47	2.47
	2	3.73	3.73	3.73	3.73	3.73	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.47	2.47	2.47
Control I/S 1.5:1	1	5.52	5.52	5.52	5.52	5.52	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	3.47	3.47	3.47
	2	5.52	5.52	5.52	5.52	5.52	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.47	3.47	3.47
	3	3.73	3.73	3.73	3.73	3.73	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.47	2.47	2.47
Control I/S 2:1	1	5.87	5.87	5.87	5.87	5.87	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	5.13	5.13	5.13
	2	6.32	6.32	6.32	6.32	6.32	6.38	6.38	6.38	6.38	6.38	5.33	5.33	5.33
Control I/S 2.5:1	1	9.10	9.10	9.10	9.10	9.10	7.31	7.31	7.31	7.31	7.31	6.80	6.80	6.80
	2	7.67	7.67	7.67	7.67	7.67	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	6.47	6.47	6.47

ตารางที่ ๓.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	104.18	63.69	31.97	37.22	15.00	26.92	13.74	13.53	25.73	47.50	62.56			
	2	0.00	112.08	77.24	36.96	37.22	32.00	26.92	18.65	23.55	38.10	62.98	82.27			
I/S 1:1	1	0.00	139.70	97.56	81.92	107.65	112.00	86.74	100.10	126.75	152.40	128.03	84.73			
	2	0.00	155.49	117.89	101.90	132.80	132.00	111.67	119.73	123.75	125.19	112.55	87.19			
	3	0.00	159.43	117.89	91.91	117.71	142.00	121.64	119.73	141.78	142.50	112.55	74.88			
I/S 1.5:1	1	0.00	203.63	192.41	196.80	152.92	127.00	126.62	100.10	176.85	142.50	88.80	62.56			
	2	0.00	215.47	199.19	141.86	132.80	127.00	121.64	129.54	154.31	110.34	91.38	67.49			
	3	0.00	187.85	165.31	156.84	162.98	137.00	121.64	129.54	176.85	130.13	91.89	72.41			
I/S 2:1	1	0.00	293.00	195.63	186.25	198.19	141.29	147.89	170.27	188.93	133.03	64.13	59.92			
	2	0.00	260.50	208.46	185.15	140.50	142.19	110.54	117.47	218.48	141.47	58.33	55.94			
	3	0.00	255.73	188.32	185.15	149.18	124.71	110.54	157.63	213.46	124.11	73.28	68.43			
I/S 2.5:1	1	0.00	327.55	314.36	111.89	117.71	132.00	171.49	183.51	111.72	90.55	73.31	60.10			
	2	0.00	323.60	247.97	161.84	194.16	146.00	146.56	183.51	111.72	159.82	73.31	52.71			
	3	0.00	247.04	239.84	141.86	142.86	127.00	136.59	183.51	114.23	85.11	60.40	57.64			

ตารางที่ ๓.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)											
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60
I/S 0.5:1	1	69.32	79.69	81.95	64.72	53.09	28.38	19.78	15.49	16.63	20.38	17.33	8.46
	2	78.59	93.67	90.94	61.03	29.42	30.81	27.49	21.73	21.59	7.39	7.37	3.83
	3	60.49	32.16	17.98	14.08	12.51	13.83	10.79	3.50	3.97	3.00	1.59	2.62
I/S 1:1	1	71.52	33.90	26.63	10.73	14.20	16.25	12.07	9.24	6.70	3.00	2.79	2.42
	2	64.90	30.41	23.17	15.76	10.82	11.40	8.22	5.50	2.23	3.20	2.39	2.22
	3	60.49	32.16	17.98	14.08	12.51	13.83	10.79	3.50	3.97	3.00	1.59	2.62
I/S 1.5:1	1	38.41	21.67	23.17	15.76	17.59	10.19	8.22	4.50	5.46	5.39	5.38	3.42
	2	47.24	33.90	19.71	14.08	10.82	10.19	9.50	3.75	5.46	3.20	4.38	3.42
	3	36.20	25.17	16.25	15.76	12.51	8.98	8.22	5.25	5.46	3.80	2.59	3.42
I/S 2:1	1	26.40	23.65	20.98	19.01	19.00	15.86	15.12	10.45	9.28	5.26	4.52	6.41
	2	36.05	18.81	20.85	19.02	18.86	14.18	13.11	9.24	6.74	7.38	6.34	4.38
	3	38.56	18.81	17.48	12.35	17.21	11.69	9.33	11.74	7.99	7.38	5.35	3.39
I/S 2.5:1	1	42.83	37.40	35.27	29.18	22.66	12.62	15.93	6.74	10.42	7.39	7.37	5.44
	2	27.37	25.17	26.63	20.79	14.20	13.83	12.07	9.24	7.94	7.39	7.37	6.45
	3	45.03	42.64	35.27	25.82	17.59	17.47	13.36	9.24	7.94	7.39	7.37	5.44

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	103.75	63.25	31.53	36.79	14.56	26.48	13.30	13.09	25.29	47.06	62.12			
	2	0.00	111.64	76.80	36.53	36.79	31.56	26.48	18.21	23.11	37.66	62.55	81.83			
	3	0.00	137.30	95.16	79.52	105.25	109.60	83.79	97.15	123.81	149.45	125.08	81.78			
I/S 1:1	1	0.00	153.09	115.49	99.50	130.40	129.60	108.72	116.78	120.80	122.24	109.60	84.24			
	2	0.00	157.03	115.49	89.51	115.31	139.60	118.69	116.78	138.84	139.56	109.60	71.93			
	3	0.00	198.90	187.68	192.07	148.18	122.27	119.42	92.90	169.66	135.31	81.60	55.37			
I/S 1.5:1	1	0.00	210.74	194.45	137.12	128.06	122.27	114.44	122.34	147.11	103.15	84.18	60.29			
	2	0.00	183.11	160.58	152.11	158.24	132.27	114.44	122.34	169.66	122.94	84.70	65.22			
	3	0.00	285.52	189.17	179.79	191.73	134.83	138.75	161.13	179.79	122.85	53.94	49.74			
I/S 2:1	1	0.00	253.01	202.00	178.69	134.04	135.73	101.40	108.33	209.35	131.29	48.14	45.76			
	2	0.00	248.24	181.86	178.69	142.71	118.25	101.40	148.49	204.32	113.92	63.10	58.25			
	3	0.00	317.15	303.96	101.49	107.31	121.60	157.29	169.32	97.53	76.36	59.12	45.91			
I/S 2.5:1	1	0.00	313.20	237.57	151.44	183.76	135.60	132.37	169.32	97.53	145.63	59.12	38.52			
	2	0.00	236.64	229.44	131.46	132.46	116.60	122.40	169.32	100.04	70.91	46.21	43.44			
	3	0.00														

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)											
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60
I/S 0.5:1	1	68.88	79.26	81.51	64.28	52.66	27.76	19.15	14.86	16.00	19.60	16.55	7.68
	2	78.15	93.24	90.50	60.60	28.98	30.19	26.86	21.11	20.97	6.61	6.59	3.05
	3	67.80	30.18	22.90	7.01	10.48	13.78	9.60	6.77	4.23	0.53	0.32	0.00
I/S 1:1	1	61.17	26.68	19.44	12.04	7.10	8.93	5.75	3.03	0.00	0.73	0.00	0.00
	2	56.76	28.43	14.25	10.36	8.79	11.36	8.32	1.03	1.50	0.53	0.00	0.15
	3	33.49	16.75	18.25	10.84	12.67	6.73	4.76	1.04	2.00	2.26	2.24	0.29
I/S 1.5:1	1	42.32	28.98	14.79	9.16	5.90	6.73	6.04	0.29	2.00	0.06	1.25	0.29
	2	31.28	20.25	11.33	10.84	7.59	5.52	4.76	1.79	2.00	0.66	0.00	0.29
	3	20.30	17.55	14.88	12.91	12.90	9.59	8.85	4.18	3.01	0.03	0.00	1.18
I/S 2:1	1	29.96	12.71	14.75	12.92	12.76	7.91	6.84	2.97	0.47	2.15	1.11	0.00
	2	32.46	12.71	11.39	6.25	11.11	5.42	3.06	5.47	1.71	2.15	0.12	0.00
	3	34.44	29.02	26.89	20.79	14.28	5.46	8.77	0.00	3.27	0.75	0.73	0.00
I/S 2.5:1	1	18.99	16.78	18.24	12.41	5.82	6.67	4.91	2.08	0.78	0.75	0.73	0.00
	2	36.65	34.26	26.89	17.44	9.20	10.31	6.20	2.08	0.78	0.75	0.73	0.00
	3												

ตารางที่ ๓.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	131.56	178.13	209.69	246.25	260.81	287.38	300.94	327.08	378.21	469.35	595.46			
	2	0.00	141.56	198.13	234.69	271.25	302.81	329.38	347.94	394.08	470.21	591.35	757.46			
	3	0.00	174.60	244.20	323.80	428.40	538.00	622.05	721.10	968.34	1,270.43	1,512.63	1,678.66			
I/S 1:1	1	0.00	194.60	279.20	378.80	508.40	638.00	747.05	866.10	1,107.34	1,354.43	1,566.63	1,737.66			
	2	0.00	199.60	284.20	373.80	488.40	628.00	747.05	866.10	1,143.34	1,425.43	1,637.63	1,783.66			
	3	0.00	253.27	390.53	582.80	730.07	852.33	972.14	1,066.94	1,405.86	1,679.46	1,837.29	1,949.73			
I/S 1.5:1	1	0.00	268.27	410.53	547.80	675.07	797.33	912.14	1,036.94	1,330.86	1,539.46	1,702.29	1,824.73			
	2	0.00	233.27	350.53	502.80	660.07	792.33	907.14	1,031.94	1,370.86	1,619.46	1,783.29	1,915.73			
	3	0.00	285.52	476.05	656.59	847.13	982.66	1,120.53	1,308.39	1,638.51	1,885.12	1,993.07	2,094.45			
I/S 2:1	1	0.00	265.52	466.05	651.59	807.13	922.66	1,020.53	1,128.39	1,545.51	1,802.12	1,899.07	1,990.45			
	2	0.00	260.52	441.05	626.59	792.13	892.66	990.53	1,138.39	1,545.51	1,768.12	1,895.07	2,011.45			
	3	0.00	404.60	626.20	727.80	834.40	956.00	1,113.81	1,286.62	1,481.85	1,636.45	1,750.50	1,843.77			
I/S 2.5:1	1	0.00	399.60	572.20	723.80	906.40	1,042.00	1,174.81	1,347.62	1,542.85	1,837.45	1,951.50	2,029.77			
	2	0.00	302.60	469.20	600.80	732.40	849.00	971.81	1,144.62	1,344.85	1,488.45	1,577.50	1,665.77			
	3	0.00	302.60	469.20	600.80	732.40	849.00	971.81	1,144.62	1,344.85	1,488.45	1,577.50	1,665.77			

ตารางที่ ๓.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	751.53	978.24	1,213.96	1,405.65	1,561.35	1,675.77	1,750.35	1,809.85	1,874.33	1,972.41	2,055.53	2,093.65		
	2	934.53	1,201.24	1,462.96	1,643.65	1,729.35	1,853.77	1,958.35	2,042.85	2,127.33	2,160.41	2,193.53	2,208.65		
	3	1,832.75	1,918.76	1,984.85	2,005.71	2,036.59	2,093.41	2,130.83	2,157.96	2,175.02	2,177.58	2,179.27	2,179.27		
I/S 1:1	1	1,876.75	1,952.76	2,008.85	2,044.71	2,065.59	2,102.41	2,124.83	2,136.96	2,136.96	2,140.52	2,140.52	2,140.52		
	2	1,912.75	1,993.76	2,034.85	2,065.71	2,091.59	2,138.41	2,170.83	2,174.96	2,181.02	2,183.58	2,183.58	2,184.28		
	3	2,026.27	2,073.76	2,126.36	2,158.65	2,195.97	2,223.71	2,242.28	2,246.45	2,254.54	2,265.74	2,277.09	2,278.46		
I/S 1.5:1	1	1,921.27	2,003.76	2,046.36	2,073.65	2,090.97	2,118.71	2,142.28	2,143.45	2,151.54	2,151.74	2,158.09	2,159.46		
	2	1,987.27	2,044.76	2,077.36	2,109.65	2,131.97	2,154.71	2,173.28	2,180.45	2,188.54	2,191.74	2,191.74	2,193.11		
	3	2,133.50	2,187.52	2,231.66	2,270.43	2,309.24	2,350.39	2,383.05	2,399.98	2,411.75	2,412.38	2,412.38	2,418.31		
I/S 2:1	1	2,049.50	2,088.52	2,132.66	2,171.43	2,210.24	2,241.39	2,269.05	2,280.98	2,282.75	2,293.38	2,299.28	2,299.28		
	2	2,075.50	2,114.52	2,148.66	2,167.43	2,201.24	2,222.39	2,235.05	2,256.98	2,263.75	2,274.38	2,275.28	2,275.28		
	3	1,922.96	2,005.24	2,082.69	2,144.63	2,186.61	2,209.11	2,243.33	2,243.33	2,256.54	2,260.08	2,263.96	2,263.96		
I/S 2.5:1	1	2,073.96	2,121.24	2,173.69	2,210.63	2,227.61	2,255.11	2,274.33	2,282.72	2,285.92	2,289.47	2,293.35	2,293.35		
	2	1,749.96	1,847.24	1,924.69	1,976.63	2,003.61	2,046.11	2,070.33	2,078.72	2,081.92	2,085.47	2,089.35	2,089.35		
	3														



ภาคผนวก ท

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรายวันและกำมะถันสะสม
ของอัตราส่วน I/S ที่สถานะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต

ตารางที่ ท.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมใช้เดิมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	92.74	56.54	28.19	32.88	13.02	23.67	11.89	11.70	22.61	42.07	55.53			
	2	0.00	99.79	68.65	32.65	32.88	28.21	23.67	16.28	20.66	33.67	55.91	73.15			
	3	0.00	122.73	85.07	71.08	94.08	97.97	74.90	86.84	110.67	133.60	111.81	73.10			
I/S 1:1	1	0.00	136.84	103.23	88.94	116.56	115.85	97.18	104.39	107.98	109.27	97.97	75.31			
	2	0.00	140.37	103.23	80.01	103.07	124.79	106.10	104.39	124.11	124.75	97.97	64.30			
	3	0.00	177.80	167.77	171.69	132.46	109.30	106.75	83.05	151.66	120.95	72.94	49.49			
I/S 1.5:1	1	0.00	188.38	173.82	122.58	114.48	109.30	102.30	109.36	131.51	92.20	75.25	53.90			
	2	0.00	163.69	143.54	135.97	141.46	118.23	102.30	109.36	151.66	109.90	75.71	58.30			
	3	0.00	255.23	169.10	160.72	171.39	120.53	124.03	144.04	160.71	109.82	48.22	44.46			
I/S 2:1	1	0.00	226.17	180.57	159.73	119.82	121.33	90.64	96.84	187.14	117.36	43.03	40.90			
	2	0.00	221.91	162.56	159.73	127.57	105.70	90.64	132.74	182.65	101.84	56.40	52.07			
	3	0.00	283.50	271.72	90.72	95.92	108.70	140.61	151.36	87.18	68.26	52.85	41.04			
I/S 2.5:1	1	0.00	279.97	212.36	135.37	164.27	121.21	118.33	151.36	87.18	130.18	52.85	34.43			
	2	0.00	211.53	205.10	117.51	118.40	104.23	109.41	151.36	89.42	63.39	41.31	38.83			
	3	0.00														

ตารางที่ ท.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกาการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ถวามมาตรฐาน แบบเดิมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกาการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)											
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60
I/S 0.5:1	1	61.57	70.85	72.87	57.46	47.07	24.81	17.12	13.29	14.31	17.52	14.80	6.87
	2	69.86	83.34	80.90	54.17	25.91	26.98	24.01	18.87	18.74	5.91	5.89	2.73
I/S 1:1	1	60.60	26.98	20.47	6.26	9.37	12.32	8.58	6.05	3.78	0.47	0.29	0.00
	2	54.68	23.85	17.38	10.76	6.34	7.99	5.14	2.71	0.00	0.65	0.00	0.00
	3	50.74	25.41	12.74	9.26	7.85	10.15	7.44	0.92	1.34	0.47	0.00	0.13
I/S 1.5:1	1	29.94	14.97	16.31	9.69	11.32	6.02	4.26	0.93	1.79	2.02	2.01	0.26
	2	37.83	25.91	13.22	8.19	5.28	6.02	5.40	0.26	1.79	0.05	1.11	0.26
	3	27.96	18.10	10.13	9.69	6.79	4.93	4.26	1.60	1.79	0.59	0.00	0.26
I/S 2:1	1	18.15	15.69	13.31	11.54	11.53	8.57	7.91	3.73	2.69	0.02	0.00	1.06
	2	26.78	11.36	13.19	11.55	11.41	7.07	6.12	2.65	0.42	1.92	0.99	0.00
	3	29.02	11.36	10.18	5.59	9.93	4.85	2.73	4.89	1.53	1.92	0.11	0.00
I/S 2.5:1	1	30.79	25.94	24.03	18.59	12.76	4.88	7.84	0.00	2.92	0.67	0.66	0.00
	2	16.98	15.00	16.31	11.09	5.20	5.96	4.39	1.86	0.70	0.67	0.66	0.00
	3	32.76	30.62	24.03	15.59	8.23	9.22	5.54	1.86	0.70	0.67	0.66	0.00

ตารางที่ ท.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	117.61	159.23	187.44	220.13	233.14	256.89	269.01	292.38	338.08	419.55	532.29			
	2	0.00	126.54	177.11	209.79	242.47	270.69	294.43	311.03	352.27	420.32	528.61	677.10			
	3	0.00	156.08	218.29	289.45	382.95	480.92	556.06	644.60	865.60	1,135.65	1,352.15	1,500.57			
I/S 1:1	1	0.00	173.95	249.58	338.61	454.46	570.31	667.80	774.22	989.86	1,210.74	1,400.42	1,553.31			
	2	0.00	178.42	254.05	334.14	436.59	561.37	667.80	774.22	1,022.04	1,274.21	1,463.89	1,594.43			
	3	0.00	226.40	349.10	520.97	652.61	761.91	869.00	953.75	1,256.71	1,501.29	1,642.37	1,742.88			
I/S 1.5:1	1	0.00	239.81	366.98	489.68	603.45	712.74	815.37	926.93	1,189.67	1,376.14	1,521.70	1,631.14			
	2	0.00	208.52	313.34	449.46	590.04	708.27	810.90	922.46	1,225.43	1,447.65	1,594.10	1,712.48			
	3	0.00	255.23	425.55	586.93	757.25	878.41	1,001.65	1,169.58	1,464.68	1,685.13	1,781.62	1,872.25			
I/S 2:1	1	0.00	237.35	416.61	582.46	721.50	824.78	912.26	1,008.68	1,381.54	1,610.94	1,697.60	1,779.28			
	2	0.00	232.88	394.26	560.11	708.09	797.96	885.44	1,017.62	1,381.54	1,580.54	1,694.02	1,798.06			
	3	0.00	361.68	559.77	650.59	745.88	854.58	995.64	1,150.12	1,324.64	1,462.83	1,564.79	1,648.17			
I/S 2.5:1	1	0.00	357.21	511.49	647.01	810.24	931.45	1,050.17	1,204.65	1,379.17	1,642.51	1,744.47	1,814.43			
	2	0.00	270.50	419.42	537.06	654.70	758.93	868.71	1,023.18	1,202.17	1,330.54	1,410.15	1,489.05			
	3	0.00	270.50	419.42	537.06	654.70	758.93	868.71	1,023.18	1,202.17	1,330.54	1,410.15	1,489.05			



ตารางที่ ๕.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	18.59	11.35	5.68	6.62	2.64	4.77	2.42	2.38	4.56	8.45	11.15			
	2	0.00	20.00	13.77	6.57	6.62	5.68	4.77	3.29	4.17	6.77	11.22	14.67			
	3	0.00	24.76	17.23	14.43	19.03	19.81	15.24	17.63	22.40	26.98	22.63	14.88			
I/S 1:1	1	0.00	27.58	20.86	18.00	23.53	23.38	19.70	21.14	21.86	22.12	19.86	15.32			
	2	0.00	28.29	20.86	16.22	20.83	25.17	21.48	21.14	25.08	25.21	19.86	13.12			
	3	0.00	35.98	33.98	34.76	26.92	22.28	21.99	17.25	30.97	24.83	15.23	10.54			
I/S 1.5:1	1	0.00	38.10	35.19	24.94	23.32	22.28	21.10	22.52	26.94	19.08	15.69	11.42			
	2	0.00	33.16	29.13	27.62	28.71	24.07	21.10	22.52	30.97	22.62	15.79	12.30			
	3	0.00	51.71	34.40	32.72	34.85	24.68	25.62	29.62	32.96	22.87	10.55	9.80			
I/S 2:1	1	0.00	45.90	36.69	32.52	24.54	24.84	18.95	20.18	38.24	24.38	9.52	9.09			
	2	0.00	45.05	33.09	32.52	26.09	21.72	18.95	27.36	37.35	21.28	12.19	11.32			
	3	0.00	57.63	55.27	19.07	20.11	22.67	29.39	31.54	18.71	14.92	11.84	9.48			
I/S 2.5:1	1	0.00	56.92	43.40	28.00	33.78	25.17	24.93	31.54	18.71	27.30	11.84	8.15			
	2	0.00	43.24	41.95	24.43	24.61	21.78	23.15	31.54	19.15	13.95	9.53	9.04			
	3	0.00	43.24	41.95	24.43	24.61	21.78	23.15	31.54	19.15	13.95	9.53	9.04			

ตารางที่ 5.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

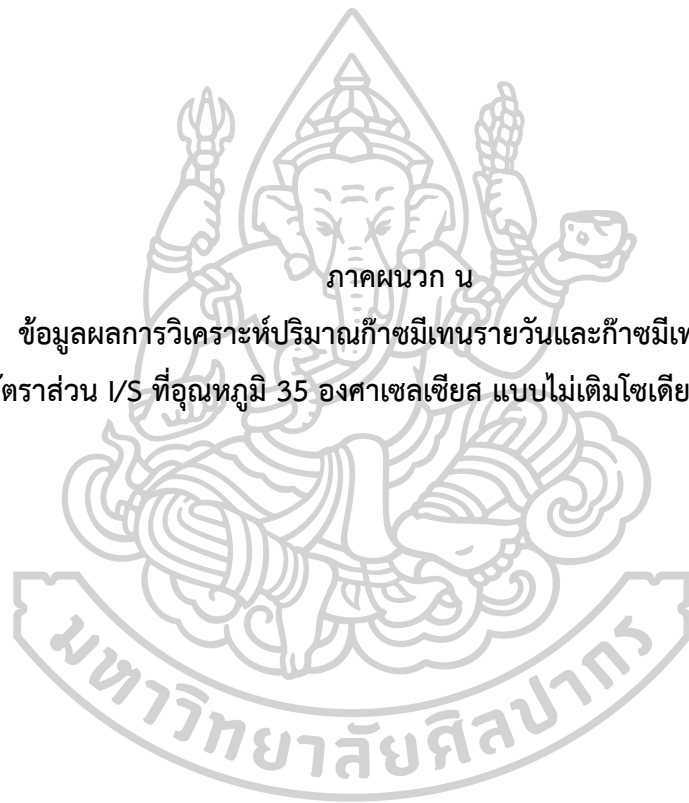
อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	12.35	14.21	14.61	11.53	9.45	5.02	3.48	2.71	2.92	3.57	3.03	1.44		
	2	14.01	16.71	16.22	10.87	5.22	5.45	4.86	3.83	3.80	1.25	1.25	0.61		
	3	10.48	5.42	2.88	2.19	1.90	2.25	1.71	0.40	0.49	0.32	0.06	0.25		
I/S 1:1	1	12.45	5.73	4.43	1.59	2.21	2.69	1.94	1.43	0.98	0.32	0.28	0.21		
	2	11.27	5.10	3.81	2.48	1.60	1.82	1.25	0.76	0.18	0.35	0.21	0.18		
	3	10.48	5.42	2.88	2.19	1.90	2.25	1.71	0.40	0.49	0.32	0.06	0.25		
I/S 1.5:1	1	6.43	3.43	3.70	2.38	2.70	1.51	1.16	0.49	0.67	0.68	0.68	0.33		
	2	8.01	5.62	3.08	2.08	1.49	1.51	1.39	0.36	0.67	0.29	0.50	0.33		
	3	6.03	4.06	2.47	2.38	1.80	1.30	1.16	0.63	0.67	0.40	0.18	0.33		
I/S 2:1	1	4.17	3.68	3.21	2.85	2.85	2.28	2.14	1.31	1.10	0.47	0.34	0.68		
	2	5.90	2.82	3.18	2.86	2.83	1.97	1.78	1.09	0.64	0.85	0.67	0.32		
	3	6.35	2.82	2.58	1.66	2.53	1.53	1.11	1.54	0.87	0.85	0.49	0.14		
I/S 2.5:1	1	6.91	5.94	5.56	4.47	3.30	1.62	2.21	0.57	1.22	0.73	0.72	0.38		
	2	4.14	3.75	4.01	2.97	1.79	1.83	1.52	1.01	0.78	0.73	0.72	0.56		
	3	7.30	6.87	5.56	3.87	2.39	2.48	1.75	1.01	0.78	0.73	0.72	0.38		

ตารางที่ 5.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบเดิมโซลิดเมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	23.56	31.92	37.61	44.18	46.82	51.61	54.08	58.83	68.05	84.42	107.04			
	2	0.00	25.35	35.50	42.08	48.65	54.33	59.12	62.48	70.81	84.49	106.23	136.00			
I/S 1:1	1	0.00	31.43	44.09	58.53	77.45	97.26	112.55	130.52	175.24	229.77	273.59	303.81			
	2	0.00	35.01	50.34	68.37	91.75	115.14	134.90	156.44	200.09	244.79	283.25	314.36			
	3	0.00	35.90	51.24	67.47	88.18	113.35	134.90	156.44	206.52	257.48	295.94	322.58			
I/S 1.5:1	1	0.00	45.70	70.67	105.46	132.22	154.50	176.56	194.15	256.00	306.21	335.69	357.09			
	2	0.00	48.38	74.24	99.21	122.38	144.66	165.83	188.79	242.59	281.18	311.55	334.74			
	3	0.00	42.13	63.52	91.16	119.70	143.77	164.94	187.89	249.75	295.48	326.03	351.01			
I/S 2:1	1	0.00	51.71	86.36	119.21	153.85	178.66	204.13	238.53	299.15	345.06	366.15	386.12			
	2	0.00	48.14	84.57	118.32	146.70	167.94	186.25	206.35	282.52	330.22	349.35	367.53			
	3	0.00	47.24	80.10	113.85	144.02	162.57	180.88	208.14	282.52	324.14	348.63	371.28			
I/S 2.5:1	1	0.00	73.26	113.81	132.91	152.89	175.56	205.05	237.21	274.60	304.77	327.66	346.91			
	2	0.00	72.37	104.16	132.19	165.77	190.94	215.95	248.11	285.50	340.71	363.60	380.16			
	3	0.00	55.03	85.74	110.20	134.66	156.43	179.66	211.82	250.10	278.31	296.73	315.08			

ภาคผนวก น
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรายวันและกำมะถันสะสม
ของอัตราส่วน I/S ที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต



ตารางที่ น.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตรังสีที่ก่อกำเนิดขึ้นจากชุดควบคุมแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณกัมมันตรังสีรายวัน (มิลลิลิตร)												
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60	
Control I/S 0.5:1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.40	0.40	0.40
Control I/S 1:1	1	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	2.93	2.93	2.93	2.93	2.93	3.13	3.13	3.13
	2	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.53	2.53	2.53
Control I/S 1.5:1	1	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	5.13	5.13	5.13
	2	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	2.99	2.99	2.99	2.99	2.99	3.20	3.20	3.20
Control I/S 2:1	1	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	7.98	7.98	7.98
	2	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	7.45	7.45	7.45
	3	5.51	5.51	5.51	5.51	5.51	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	6.52	6.52	6.52
Control I/S 2.5:1	1	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92	8.46	8.46	8.46
	2	10.17	10.17	10.17	10.17	10.17	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	7.06	7.06	7.06

ตารางที่ น.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมโซเดียมไปคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	87.00	27.00	37.00	42.00	16.00	9.00	6.00	0.98	1.02	1.00	0.50			
	2	0.00	57.00	27.00	13.00	37.00	52.00	15.00	6.00	0.98	1.02	0.50	0.50			
	3	0.00	67.00	27.00	27.00	72.00	17.00	8.00	6.00	0.98	0.51	0.50	0.10			
I/S 1:1	1	0.00	137.00	57.00	32.00	17.00	7.00	6.00	2.00	0.98	1.02	1.00	0.50			
	2	0.00	137.00	62.00	27.00	17.00	10.00	5.00	2.00	0.98	0.51	0.50	0.50			
I/S 1.5:1	1	0.00	227.00	67.00	27.00	17.00	6.00	8.00	2.00	0.98	1.02	1.00	1.00			
	2	0.00	197.00	52.00	32.00	14.00	8.00	9.00	5.00	0.98	1.02	1.00	1.00			
	3	0.00	193.00	52.00	37.00	13.00	8.00	7.00	2.00	0.98	0.51	1.00	0.50			
I/S 2:1	1	0.00	191.69	113.56	56.72	34.51	12.57	22.16	11.19	8.63	8.37	8.67	8.65			
	2	0.00	206.27	121.45	41.79	34.51	23.04	22.16	24.61	20.14	19.35	37.11	46.80			
I/S 2.5:1	1	0.00	370.00	147.00	122.00	87.00	67.00	87.00	82.00	74.50	146.47	148.54	81.58			
	2	0.00	370.00	137.00	132.00	97.00	57.00	97.00	82.00	133.81	146.47	131.09	81.08			
	3	0.00	345.00	137.00	122.00	97.00	77.00	87.00	87.00	150.96	154.10	123.61	61.06			

ตารางที่ น.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไฮโดรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)												
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60	
I/S 0.5:1	1	0.46	0.35	0.07	0.10	0.10	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.14	0.35	0.34	0.33	0.10	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.46	0.35	0.34	0.13	0.10	0.07	0.03	0.02	0.07	0.06	0.02	0.00	0.00
I/S 1:1	1	0.46	0.70	0.34	0.67	2.04	10.37	35.85	25.38	12.99	20.37	47.65	22.36	22.36
	2	0.91	0.35	0.34	0.33	0.34	2.22	29.04	38.32	10.49	13.38	29.43	48.52	48.52
I/S 1.5:1	1	0.46	0.70	0.34	0.67	2.04	10.37	46.21	31.60	31.73	41.53	34.63	27.36	27.36
	2	0.46	1.04	0.34	0.67	0.68	2.47	13.13	44.29	27.99	22.36	37.64	48.52	48.52
	3	0.46	0.35	0.34	0.33	0.34	2.71	18.94	38.32	19.49	12.18	25.42	44.53	44.53
I/S 2:1	1	19.76	61.61	82.11	64.32	41.68	77.35	71.75	61.71	34.97	25.14	12.47	13.26	13.26
	2	83.76	70.27	50.86	52.06	74.48	64.79	42.95	42.63	28.68	25.14	14.49	10.29	10.29
I/S 2.5:1	1	30.52	54.62	34.58	32.34	26.18	23.94	21.97	12.94	12.99	7.39	8.41	6.39	6.39
	2	46.47	40.70	32.20	28.01	17.68	17.77	10.60	11.69	12.49	9.78	7.41	7.39	7.39
	3	39.63	44.18	32.88	25.67	26.18	17.77	17.42	19.90	9.50	11.18	7.41	6.39	6.39

ตารางที่ น.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไนโตรเจน (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	87.00	27.00	37.00	42.00	16.00	9.00	6.00	0.98	1.02	1.00	0.50			
	2	0.00	57.00	27.00	13.00	37.00	52.00	15.00	6.00	0.98	1.02	0.50	0.50			
	3	0.00	67.00	27.00	27.00	72.00	17.00	8.00	6.00	0.98	0.51	0.50	0.10			
I/S 1:1	1	0.00	137.00	57.00	32.00	17.00	7.00	5.99	1.99	0.97	1.00	0.98	0.49			
	2	0.00	137.00	62.00	27.00	17.00	10.00	4.99	1.99	0.97	0.49	0.48	0.49			
I/S 1.5:1	1	0.00	227.00	67.00	27.00	17.00	6.00	7.80	1.80	0.78	0.82	0.80	0.80			
	2	0.00	197.00	52.00	32.00	14.00	8.00	8.80	4.80	0.78	0.82	0.80	0.80			
	3	0.00	193.00	52.00	37.00	13.00	8.00	6.80	1.80	0.78	0.31	0.80	0.30			
I/S 2:1	1	0.00	190.69	112.57	55.72	33.52	11.57	21.16	10.19	7.64	7.37	7.68	7.65			
	2	0.00	205.27	120.45	40.79	33.52	22.04	21.16	23.61	19.15	18.35	36.11	45.80			
I/S 2.5:1	1	0.00	370.00	147.00	122.00	87.00	67.00	81.56	76.56	69.06	141.02	143.09	76.14			
	2	0.00	370.00	137.00	132.00	97.00	57.00	91.56	76.56	128.36	141.02	125.65	75.64			
	3	0.00	345.00	137.00	122.00	97.00	77.00	81.56	81.56	145.52	148.65	118.17	55.62			

ตารางที่ น.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไนโตรเจน (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
I/S 0.5:1	1	0.46	0.35	0.07	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.14	0.35	0.34	0.33	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.46	0.35	0.34	0.13	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I/S 1:1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	8.90	34.39	23.91	11.53	17.53	44.82	19.53			
	2	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	27.57	36.85	9.03	10.55	26.60	45.69			
I/S 1.5:1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.47	42.31	27.70	27.84	37.37	30.47	23.19			
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.23	40.39	24.09	18.20	33.47	44.36			
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.04	34.42	15.59	8.02	21.26	40.37			
I/S 2:1	1	14.61	56.46	76.96	59.17	36.53	72.48	66.88	56.84	30.10	17.43	4.76	5.55			
	2	78.61	65.11	45.71	46.90	69.32	59.92	38.08	37.76	23.81	17.43	6.77	2.58			
I/S 2.5:1	1	22.32	46.41	26.37	24.14	17.97	16.67	14.70	5.67	5.73	0.00	0.65	0.00			
	2	38.26	32.50	24.00	19.80	9.48	10.50	3.34	4.43	5.23	2.02	0.00	0.00			
	3	31.43	35.98	24.68	17.47	17.97	10.50	10.16	12.64	2.23	3.42	0.00	0.00			

ตารางที่ น.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไฮโดรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	87.00	114.00	151.00	193.00	209.00	218.00	224.00	226.00	228.00	230.00	231.00			
	2	0.00	57.00	84.00	97.00	134.00	186.00	201.00	207.00	209.00	211.00	212.00	213.00			
	3	0.00	67.00	94.00	121.00	193.00	210.00	218.00	224.00	226.00	227.00	228.00	228.20			
I/S 1:1	1	0.00	137.00	194.00	226.00	243.00	250.00	255.99	257.97	259.94	261.91	263.88	264.85			
	2	0.00	137.00	199.00	226.00	243.00	253.00	257.99	259.97	261.94	262.91	263.88	264.85			
I/S 1.5:1	1	0.00	227.00	294.00	321.00	338.00	344.00	351.80	353.60	355.21	356.81	358.42	360.01			
	2	0.00	197.00	249.00	281.00	295.00	303.00	311.80	316.60	318.21	319.81	321.42	323.01			
	3	0.00	193.00	245.00	282.00	295.00	303.00	309.80	311.60	313.21	313.81	315.42	316.01			
I/S 2:1	1	0.00	255.67	320.10	369.54	398.97	403.41	417.31	417.21	433.04	447.05	462.89	477.84			
	2	0.00	275.67	345.10	379.54	408.97	423.41	437.31	449.21	489.04	524.05	598.89	688.84			
I/S 2.5:1	1	0.00	370.00	517.00	639.00	726.00	793.00	874.56	951.11	1,092.46	1,369.56	1,656.84	1,808.82			
	2	0.00	370.00	507.00	639.00	736.00	793.00	884.56	961.11	1,223.46	1,500.56	1,752.84	1,903.82			
	3	0.00	345.00	482.00	604.00	701.00	778.00	859.56	941.11	1,238.46	1,530.56	1,767.84	1,878.82			

ตารางที่ น.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แบบไม่เติมไฮโดรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	232.00	233.00	233.20	233.50	233.80	233.80	233.80	233.80	233.80	233.80	233.80	233.80	233.80	233.80
	2	213.30	214.30	215.30	216.30	216.60	216.60	216.60	216.60	216.60	216.60	216.60	216.60	216.60	216.60
	3	229.20	230.20	231.20	231.60	231.90	231.90	231.90	231.90	231.90	231.90	231.90	231.90	231.90	231.90
I/S 1:1	1	264.85	264.85	264.85	264.85	268.50	304.46	440.77	536.91	583.02	670.75	894.62	992.51		
	2	265.18	265.18	265.18	265.18	265.18	268.14	377.45	525.59	561.69	614.42	747.30	976.19		
I/S 1.5:1	1	360.01	360.01	360.01	360.01	360.01	385.94	553.82	665.24	776.56	963.57	1,115.80	1,232.05		
	2	323.01	323.01	323.01	323.01	323.01	323.01	359.89	522.30	618.63	709.64	876.87	1,099.11		
	3	316.01	316.01	316.01	316.01	316.01	316.01	375.89	514.30	576.63	616.64	722.87	925.11		
I/S 2:1	1	508.63	671.39	902.52	1,080.61	1,187.17	1,475.12	1,743.84	1,972.52	2,091.51	2,180.84	2,206.47	2,236.51		
	2	855.63	1,043.39	1,180.52	1,321.61	1,524.17	1,762.12	1,914.84	2,066.52	2,160.51	2,249.84	2,285.47	2,300.51		
I/S 2.5:1	1	1,858.40	1,991.21	2,069.19	2,141.67	2,194.20	2,261.25	2,320.05	2,343.01	2,365.78	2,365.78	2,369.06	2,369.06		
	2	1,988.40	2,081.21	2,152.19	2,211.67	2,239.20	2,281.25	2,295.05	2,313.01	2,333.78	2,343.67	2,343.67	2,343.67		
	3	1,948.40	2,051.21	2,124.19	2,176.67	2,229.20	2,271.25	2,312.05	2,363.01	2,371.78	2,388.67	2,388.67	2,388.67		



ภาคผนวก บ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรายวันและกำมะถันสะสม
ของอัตราส่วน I/S ที่สถานะมาตรฐาน แบบไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต

ตารางที่ ป.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไฮคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	77.77	24.14	33.07	37.54	14.30	8.05	5.36	0.88	0.91	0.89	0.45			
	2	0.00	50.95	24.14	11.62	33.07	46.48	13.41	5.36	0.88	0.91	0.45	0.45			
	3	0.00	59.89	24.14	24.14	64.36	15.20	7.15	5.36	0.88	0.45	0.45	0.09			
I/S 1:1	1	0.00	122.47	50.95	28.61	15.20	6.26	5.35	1.77	0.86	0.90	0.88	0.43			
	2	0.00	122.47	55.42	24.14	15.20	8.94	4.46	1.77	0.86	0.44	0.43	0.43			
I/S 1.5:1	1	0.00	202.92	59.89	24.14	15.20	5.36	6.97	1.61	0.70	0.73	0.71	0.72			
	2	0.00	176.10	46.48	28.61	12.51	7.15	7.87	4.29	0.70	0.73	0.71	0.72			
	3	0.00	172.52	46.48	33.07	11.62	7.15	6.08	1.61	0.70	0.28	0.71	0.27			
I/S 2:1	1	0.00	170.46	100.63	49.81	29.96	10.34	18.92	9.11	6.83	6.59	6.86	6.84			
	2	0.00	183.49	107.68	36.47	29.96	19.70	18.92	21.11	17.12	16.41	32.28	40.94			
I/S 2.5:1	1	0.00	330.75	131.40	109.06	77.77	59.89	72.90	68.43	61.73	126.06	127.91	68.06			
	2	0.00	330.75	122.47	118.00	86.71	50.95	81.84	68.43	114.74	126.06	112.32	67.62			
	3	0.00	308.40	122.47	109.06	86.71	68.83	72.90	72.90	130.08	132.88	105.63	49.72			

ตารางที่ ป.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมไฮโดรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	0.41	0.31	0.06	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.12	0.31	0.30	0.30	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.41	0.31	0.30	0.12	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I/S 1:1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.12	7.96	30.74	21.38	10.30	15.67	40.06	17.46		
	2	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	24.65	32.94	8.07	9.43	23.78	40.84		
I/S 1.5:1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.78	37.82	24.76	24.88	33.40	27.24	20.73		
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.25	36.11	21.53	16.27	29.92	39.65		
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.44	30.77	13.94	7.17	19.01	36.08		
I/S 2:1	1	13.06	50.47	68.79	52.89	32.65	64.79	59.78	50.81	26.91	15.58	4.25	4.96		
	2	70.27	58.20	40.86	41.92	61.97	53.57	34.04	33.75	21.28	15.58	6.05	2.30		
I/S 2.5:1	1	19.95	41.49	23.58	21.58	16.07	14.90	13.14	5.07	5.12	0.00	0.58	0.00		
	2	34.21	29.05	21.46	17.70	8.47	9.39	2.98	3.96	4.67	1.81	0.00	0.00		
	3	28.10	32.16	22.06	15.62	16.07	9.39	9.08	11.30	1.99	3.06	0.00	0.00		

ตารางที่ ป.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน แบบไม่เติมไฮเดรียมไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	77.77	101.91	134.98	172.52	186.83	194.87	200.24	202.02	203.81	205.60	206.49			
	2	0.00	50.95	75.09	86.71	119.78	166.27	179.68	185.04	186.83	188.61	189.51	190.40			
	3	0.00	59.89	84.03	108.16	172.52	187.72	194.87	200.24	202.02	202.92	203.81	203.99			
I/S 1:1	1	0.00	122.47	173.42	202.02	217.22	223.48	228.83	230.60	232.36	234.12	235.89	236.75			
	2	0.00	122.47	177.89	202.02	217.22	226.16	230.62	232.39	234.15	235.02	235.89	236.75			
I/S 1.5:1	1	0.00	202.92	262.81	286.94	302.14	307.50	314.48	316.09	317.53	318.96	320.39	321.82			
	2	0.00	176.10	222.58	251.19	263.70	270.85	278.72	283.01	284.45	285.88	287.32	288.74			
	3	0.00	172.52	219.01	252.08	263.70	270.85	276.93	278.54	279.98	280.52	281.95	282.49			
I/S 2:1	1	0.00	228.84	286.07	329.89	355.83	359.42	373.15	374.37	388.60	401.20	415.44	428.89			
	2	0.00	246.72	308.42	338.83	364.77	377.30	391.03	402.97	438.66	470.03	537.01	617.50			
I/S 2.5:1	1	0.00	330.75	462.15	571.21	648.98	708.87	781.77	850.21	976.56	1,224.26	1,481.07	1,616.92			
	2	0.00	330.75	453.21	571.21	657.92	708.87	790.71	859.15	1,093.66	1,341.37	1,566.88	1,701.84			
	3	0.00	308.40	430.86	539.92	626.63	695.46	768.36	841.27	1,111.73	1,377.71	1,594.54	1,698.73			

ตารางที่ ป.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมไฮโดรเจนไปคาร์บอนเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)														
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60			
I/S 0.5:1	1	207.39	208.28	208.46	208.73	209.00	209.00	209.00	209.00	209.00	209.00	209.00	209.00	209.00	209.00	209.00
	2	190.67	191.56	192.46	193.35	193.62	193.62	193.62	193.62	193.62	193.62	193.62	193.62	193.62	193.62	193.62
	3	204.88	205.78	206.67	207.03	207.30	207.30	207.30	207.30	207.30	207.30	207.30	207.30	207.30	207.30	207.30
I/S 1:1	1	236.75	236.75	236.75	236.75	240.01	272.16	394.01	479.95	521.16	599.59	799.71	887.21			
	2	237.04	237.04	237.04	237.04	237.04	239.69	337.40	469.83	502.10	549.24	668.02	872.62			
I/S 1.5:1	1	321.82	321.82	321.82	321.82	321.82	345.00	495.06	594.66	694.17	861.35	997.42	1,101.34			
	2	288.74	288.74	288.74	288.74	288.74	288.74	321.71	466.89	552.99	634.35	783.84	982.51			
	3	282.49	282.49	282.49	282.49	282.49	282.49	336.01	459.74	515.45	551.22	646.18	826.97			
I/S 2:1	1	456.64	602.44	809.37	968.89	1,064.46	1,322.45	1,563.26	1,768.28	1,875.23	1,953.30	1,974.44	1,999.49			
	2	766.83	934.97	1,057.88	1,184.32	1,365.71	1,579.00	1,716.12	1,852.31	1,936.91	2,014.98	2,045.06	2,056.70			
I/S 2.5:1	1	1,661.24	1,779.96	1,849.67	1,914.46	1,961.41	2,021.35	2,073.92	2,094.44	2,114.79	2,114.79	2,117.72	2,117.72			
	2	1,777.45	1,860.41	1,923.86	1,977.03	2,001.64	2,039.23	2,051.57	2,067.62	2,086.19	2,095.02	2,095.02	2,095.02			
	3	1,741.69	1,833.59	1,898.83	1,945.74	1,992.70	2,030.29	2,066.77	2,112.31	2,120.16	2,135.25	2,135.25	2,135.25			



ภาคผนวก ป

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันและก๊าซมีเทนสะสม
ของอัตราส่วน I/S ที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เต็มโซเดียมไบคาร์บอเนต

ตารางที่ ป.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ถาวรมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตริมาตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	15.55	4.83	6.61	7.51	2.86	1.61	1.07	0.18	0.18	0.18	0.09			
	2	0.00	10.19	4.83	2.32	6.61	9.30	2.68	1.07	0.18	0.18	0.09	0.09			
	3	0.00	11.98	4.83	4.83	12.87	3.04	1.43	1.07	0.18	0.09	0.09	0.02			
I/S 1:1	1	0.00	24.49	10.19	5.72	3.04	1.25	1.07	0.36	0.17	0.18	0.18	0.09			
	2	0.00	24.49	11.08	4.83	3.04	1.79	0.89	0.36	0.17	0.09	0.09	0.09			
I/S 1.5:1	1	0.00	40.58	11.98	4.83	3.04	1.07	1.41	0.34	0.16	0.16	0.16	0.16			
	2	0.00	35.22	9.30	5.72	2.50	1.43	1.59	0.88	0.16	0.16	0.16	0.16			
	3	0.00	34.50	9.30	6.61	2.32	1.43	1.23	0.34	0.16	0.07	0.16	0.07			
I/S 2:1	1	0.00	34.18	20.21	10.05	6.08	2.16	3.87	1.91	1.45	1.41	1.46	1.46			
	2	0.00	36.79	21.62	7.38	6.08	4.03	3.87	4.31	3.51	3.37	6.55	8.28			
I/S 2.5:1	1	0.00	66.15	26.28	21.81	15.55	11.98	15.07	14.17	12.83	25.70	26.07	14.10			
	2	0.00	66.15	24.49	23.60	17.34	10.19	16.86	14.17	23.44	25.70	22.95	14.01			
	3	0.00	61.68	24.49	21.81	17.34	13.77	15.07	15.07	26.50	27.06	21.61	10.43			

ตารางที่ ป.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรัมมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)													
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60		
I/S 0.5:1	1	0.08	0.06	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.02	0.06	0.06	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.08	0.06	0.06	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I/S 1:1	1	0.01	0.05	0.00	0.05	0.29	1.72	6.28	4.41	2.19	3.64	8.52	3.21		
	2	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	5.06	6.72	1.75	2.39	5.26	7.89		
I/S 1.5:1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.50	7.91	5.30	5.32	7.42	6.19	3.55		
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	2.00	7.57	4.65	4.00	6.73	7.34		
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	3.04	6.50	3.14	2.18	4.55	6.62		
I/S 2:1	1	3.07	10.55	14.22	11.04	6.99	13.39	12.39	10.60	5.82	3.81	1.54	1.68		
	2	14.51	12.10	8.63	8.85	12.85	11.15	7.24	7.19	4.69	3.81	1.90	1.15		
I/S 2.5:1	1	4.72	9.03	5.45	5.05	3.95	3.63	3.28	1.66	1.67	1.32	1.50	0.00		
	2	7.57	6.54	5.02	4.27	2.43	2.53	1.25	1.44	1.58	1.75	1.32	0.00		
	3	6.35	7.17	5.15	3.86	3.95	2.53	2.47	2.91	1.05	2.00	1.32	0.00		

ตารางที่ ป.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตที่ก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ลภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)														
		วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 9	วันที่ 11	วันที่ 13	วันที่ 15			
I/S 0.5:1	1	0.00	15.55	20.38	27.00	34.50	37.37	38.97	40.05	40.40	40.76	41.12	41.30			
	2	0.00	10.19	15.02	17.34	23.96	33.25	35.94	37.01	37.37	37.72	37.90	38.08			
	3	0.00	11.98	16.81	21.63	34.50	37.54	38.97	40.05	40.40	40.58	40.76	40.80			
I/S 1:1	1	0.00	24.49	34.68	40.40	43.44	44.70	45.77	46.12	46.48	46.83	47.19	47.36			
	2	0.00	24.49	35.58	40.40	43.44	45.23	46.12	46.48	46.84	47.01	47.19	47.36			
I/S 1.5:1	1	0.00	40.58	52.56	57.39	60.43	61.50	62.91	63.25	63.58	63.90	64.22	64.54			
	2	0.00	35.22	44.52	50.24	52.74	54.17	55.76	56.64	56.96	57.28	57.60	57.93			
	3	0.00	34.50	43.80	50.42	52.74	54.17	55.40	55.74	56.07	56.21	56.53	56.67			
I/S 2:1	1	0.00	46.39	58.55	68.03	73.93	75.36	78.88	79.90	82.93	85.62	88.65	91.52			
	2	0.00	49.97	63.02	69.82	75.72	78.94	82.46	85.62	92.94	99.39	112.97	129.24			
I/S 2.5:1	1	0.00	66.15	92.43	114.24	129.80	141.77	156.84	171.01	197.24	247.75	300.07	328.23			
	2	0.00	66.15	90.64	114.24	131.58	141.77	158.63	172.80	220.66	271.17	317.23	345.21			
	3	0.00	61.68	86.17	107.98	125.33	139.09	154.16	169.23	223.34	276.54	319.92	340.74			

ตารางที่ ป.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลผลิตที่ก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน แบบไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (การทดลองชุดที่ 2) (ต่อ)

อัตราส่วน	การวิเคราะห์	ผลผลิตปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)												
		วันที่ 17	วันที่ 20	วันที่ 23	วันที่ 26	วันที่ 29	วันที่ 33	วันที่ 37	วันที่ 41	วันที่ 45	วันที่ 50	วันที่ 55	วันที่ 60	
I/S 0.5:1	1	41.48	41.66	41.69	41.75	41.80	41.80	41.80	41.80	41.80	41.80	41.80	41.80	41.80
	2	38.13	38.31	38.49	38.67	38.72	38.72	38.72	38.72	38.72	38.72	38.72	38.72	38.72
	3	40.98	41.16	41.33	41.41	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46	41.46
I/S 1:1	1	47.39	47.54	47.54	47.69	48.55	55.52	80.40	98.11	106.88	123.84	165.13	183.89	
	2	47.57	47.57	47.57	47.57	47.57	48.64	68.69	95.70	102.68	113.39	138.40	180.59	
I/S 1.5:1	1	64.54	64.54	64.54	64.54	64.81	70.88	102.25	123.56	144.87	180.18	209.25	231.89	
	2	57.93	57.93	57.93	57.93	57.93	58.28	66.22	96.65	115.27	133.42	165.18	206.77	
	3	56.67	56.67	56.67	56.67	56.67	57.21	69.26	95.40	107.94	116.97	137.82	175.84	
I/S 2:1	1	98.05	128.54	171.31	204.61	225.07	278.40	328.31	371.07	394.20	413.27	420.92	429.42	
	2	160.08	195.05	221.01	247.69	285.32	329.71	358.89	387.88	406.53	425.60	435.05	440.86	
I/S 2.5:1	1	338.65	364.55	380.64	395.79	407.37	422.04	435.07	441.77	448.45	451.57	455.62	457.88	
	2	361.89	380.64	395.48	408.31	415.42	425.61	430.60	436.41	442.73	448.00	451.15	454.31	
	3	354.74	375.28	390.48	402.05	413.63	423.82	433.64	443.35	449.53	456.04	459.20	461.46	



ภาคผนวก ผ

ลักษณะผลิตภัณฑ์เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารหลังกระบวนการย่อยสลาย

(FW/CFPP)

ตารางที่ ๘.1

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดงาที่เกิดกับเชื้อราที่เชื้อชีวภาพบรรจุอาหารตลอดระยะเวลาการหมัก แบบเดิมโดยใช้ไมโครบิโอเมต (การทดลองชุดที่ 1)

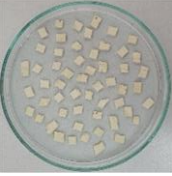
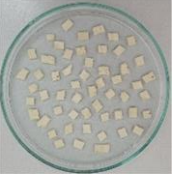


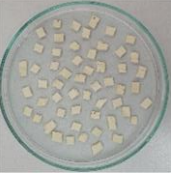
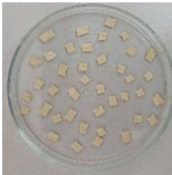


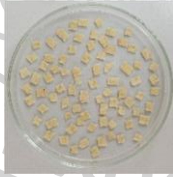
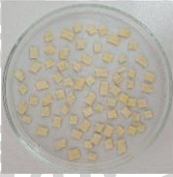

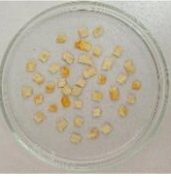




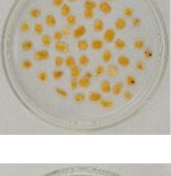



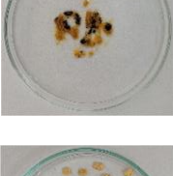




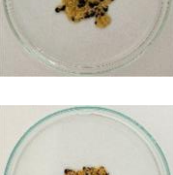






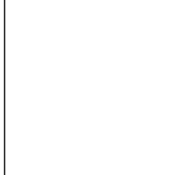







อัตราส่วน	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
FW/CFPP 80:20								
FW/CFPP 60:40								
FW/CFPP 40:60								
FW/CFPP 20:80								
FW/CFPP 0:100								

หมายเหตุ. - ตัวอย่างถูกย่อยสลายจนไม่สามารถแยกแยะกับตัวอย่างออกจากหัวเชื้อเริ่มต้นได้



ตารางที่ ๘.1

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดงาที่เชื้อราเจริญขึ้นภายใต้สภาวะการทดลอง (การทดลองชุดที่ 2)

อัตราส่วน	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 5	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 29	วันที่ 45	วันที่ 60
I/S 0.5:1								
I/S 1:1								
I/S 1.5:1								
I/S 2:1								
I/S 2.5:1								



ภาคผนวก พ
การเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับชาติ

การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงาน

เครือข่ายพัฒนาความเข้มแข็งต่อภัยพิบัติไทยระดับชาติ ครั้งที่ 1

หัวข้อ “ความยืดหยุ่นของภัยพิบัติในพื้นที่เมืองและความเป็นอยู่ที่ดีของชุมชน”

วันศุกร์ที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2566 เวลา 08:00 – 16:00 น.

ณ ห้องสัมมนา KSS-801 ชั้น 8 อาคารเกษมศรี มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช



การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้เข้าร่วมการประชุม

1) ชื่อ-นามสกุล ดร.วิจารณ์ สิวาฉายา (ผู้แสดงปาฐกถา)

หน่วยงาน มูลนิธิสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย

ชื่อเรื่อง ความเปราะบางของเมืองและชุมชนเขตเมืองต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
ประเด็นที่แลกเปลี่ยนความคิดเห็น

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ประเทศไทยสามารถเกิดภัยพิบัติรุนแรงและฉับพลัน ดังเช่น การเกิดไฟป่ารุนแรงที่เกิดขึ้นในประเทศออสเตรเลียได้หรือไม่ และประเทศไทยควรมีแนวทางป้องกันหรือมีแนวทางรับมือกับภัยพิบัติรุนแรงที่จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกอย่างไรบ้าง

ความคิดเห็นของผู้แสดงปาฐกถา

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกจะไม่ส่งผลให้ประเทศไทยเกิดไฟป่ารุนแรงแบบที่เกิดขึ้นในประเทศออสเตรเลีย เพราะผืนป่าส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นป่าดิบชื้น จึงมีความเป็นไปได้ น้อยมากที่จะเกิดไฟป่ารุนแรงและฉับพลัน ทั้งนี้ไฟป่าที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมักมีสาเหตุมาจากมนุษย์ เป็นส่วนใหญ่ เช่น การเผาขยะ และการเผาพื้นที่ทำการเกษตรก่อน/หลังการเพาะปลูก เป็นต้น ดังนั้นภาครัฐควรเข้ามามีบทบาทในการณรงค์และให้ความรู้แก่ภาคประชาชนอย่างต่อเนื่อง รวมถึงวางนโยบายเพื่อรองรับและตอบโต้ภัยเกี่ยวกับการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เกิดประสิทธิภาพและมีความยั่งยืนมากที่สุด

ภาพที่ พ.1

การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้แสดงปาฐกถา



- 2) **ชื่อ-นามสกุล** ดร.พลปรีชา ชิตบุรี (ผู้นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์)
หน่วยงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
ชื่อผลงาน การติดตามจุดความร้อนและความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ด้วยเทคโนโลยีอวกาศเพื่อลดปัญหาหมอกพิษทางอากาศในประเทศอย่างยั่งยืน

ประเด็นที่แลกเปลี่ยนความคิดเห็น

ชุดข้อมูลการติดตามจุดความร้อนที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม Suomi-NPP ของระบบ VIIRS และชุดข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ที่ได้จากการประยุกต์เทคโนโลยีอวกาศด้วยภาพถ่ายดาวเทียมผลิตภัณฑ์ MERRA-2 ซึ่งผ่านการวิเคราะห์ผลด้วยระบบสารสนเทศศาสตร์ และแสดงผลการศึกษาผ่านระบบรายงานผล (Dashboard) มีการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างไรบ้าง และในอนาคตมีแผนดำเนินงานการใช้ประโยชน์จากโครงการไปในทิศทางใด

ความคิดเห็นของผู้นำเสนอผลงาน

ข้อมูลการติดตามจุดความร้อนในปี พ.ศ. 2561 - 2565 แสดงให้เห็นว่า จังหวัดที่มีความเสี่ยงสูงในการได้รับผลกระทบ คือ แม่ฮ่องสอน กาญจนบุรี และตาก ตามลำดับ ดังนั้น องค์การบริหารส่วนจังหวัดของทั้ง 3 จังหวัดดังกล่าว สามารถนำไปข้อเท็จจริงนี้ไปใช้ในการวางแผนหรือออกมาตรการป้องกันและรับมือกับปัญหาไฟป่าหรือกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ที่อาจส่งผลให้เกิดปัญหาฝุ่นตามมาได้ ส่วนชุดข้อมูลฝุ่นในปี พ.ศ. 2561 - 2565 แสดงให้เห็นว่า จังหวัดเชียงราย เป็นจังหวัดที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาฝุ่นละอองสูงที่สุด ดังนั้นองค์การบริหารส่วนจังหวัดเชียงราย สามารถนำข้อเท็จจริงนี้ไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนเพื่อวางแผนรับมือกับเหตุการณ์ฝุ่นควันที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในอนาคต โครงการฯ มีแผนงานในการจัดเก็บชุดข้อมูลที่มีความสดใหม่และเก็บซ้ำในระดับที่สามารถนำเอาข้อมูลชุดนั้นไปใช้งานได้ก่อนข้อมูลจะมีการเปลี่ยนแปลง (Real-Time Data) ซึ่งอาจจัดทำให้อยู่ในรูปของแอปพลิเคชัน (Application) เพื่อให้ประชาชนหรือหน่วยงานรัฐเข้าถึงข้อมูลที่ครอบคลุมทั่วทั้งประเทศไทยได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น

ภาพที่ พ.2

การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์



- 3) **ชื่อ-นามสกุล** ดร.ชายุกร พระบำรุง (ผู้นำเสนอผลงานแบบบรรยาย)
หน่วยงาน คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ชื่อผลงาน การสร้างเมืองยืดหยุ่นด้วยกลยุทธ์การศึกษา ภายใต้โครงการ MCR2030 กรณีของเมืองมหาสารคาม

ประเด็นที่แลกเปลี่ยนความคิดเห็น

นอกจากนักศึกษา/สถาบันการศึกษาภายในเทศบาลเมืองมหาสารคามที่มีส่วนร่วมกับโครงการ “การสร้างเมืองยืดหยุ่นด้วยกลยุทธ์การศึกษา ภายใต้โครงการ MCR2030 กรณีของเมืองมหาสารคาม” แล้ว ไม่ทราบว่า ในส่วนของภาคประชาชนของเทศบาลเมืองมหาสารคามมีส่วนร่วมกับโครงการฯ อย่างไรบ้าง

ความคิดเห็นของผู้นำเสนอผลงาน

ผู้ดูแลโครงการฯ และเทศบาลเมืองมหาสารคาม ได้มีการประชุมร่วมกับหัวหน้าชุมชนต่าง ๆ ภายในเขตเทศบาลเมืองมหาสารคาม เพื่อสอบถามข้อมูลเกี่ยวกับความพร้อมและปัญหาต่าง ๆ ที่แต่ละชุมชนอาจได้รับผลกระทบจากการดำเนินการโครงการฯ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้ถูกนำมาวิเคราะห์และนำไปสู่การหาแนวทางการแก้ปัญหาและปฏิบัติงานร่วมกันระหว่างภาคประชาชนและภาครัฐได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาพที่ พ.3

การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้นำเสนอผลงานแบบบรรยาย



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายณัฐพล เสวตบุตร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2559 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2560 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานตีพิมพ์	ณัฐพล เสวตบุตร, ดาวรุ่ง สังข์ทอง, นภวรรณ รัตสุข และ อุมารัจน์ สันติสุข เกษม. (2566). ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและจลนพลศาสตร์ของการหมัก ร่วมระหว่างเศษอาหารและผลิตภัณฑ์เยื่อชีวภาพบรรจุอาหาร. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 19(3). 31 หน้า.

