



อิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์  
ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว

โดย

นางสาววิทยาภรณ์ คงอยู่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์  
ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

INFLUENCE OF PRETREATMENT WITH CALCIUM HYDROXIDE  
ON BIOGAS PRODUCTION FROM RICE STRAW



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)  
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2018  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	อิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อ การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว
โดย	วิทยาภรณ์ คงอยู่
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

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

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

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

58311305 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ฟางข้าว, วัสดุลิกโนเซลลูโลส, การปรับสภาพเบื้องต้น, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

นางสาว วิทยาภรณ์ คงอยู่: อิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการปรับสภาพฟางข้าวภายใต้สภาวะการปรับสภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ การปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 เป็นระยะเวลา 3 6 และ 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง รวมทั้งหมด 18 สภาวะ จากนั้นได้นำฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 18 สภาวะ มาศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธี Biochemical Methane Potential หรือวิธีบีเอ็มพี นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพในแต่ละสภาวะโดยใช้สมการ Modified Gompertz เมื่อพิจารณาผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน อย่างไรก็ตาม พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ตลอดระยะเวลา 30 วัน อยู่ระหว่าง 265 – 310 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ซึ่งสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างเห็นได้ชัดเจน (171 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย) คิดเป็นร้อยละ 55.0 – 81.3 ทั้งนี้ฟางข้าวที่ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดคือ ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อพิจารณาผลการศึกษเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว พบว่า สมการ Modified Gompertz มีความเหมาะสมในการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวแบบไม่ใช้อากาศ กล่าวคือ สามารถอธิบายผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดลองด้วยวิธีบีเอ็มพีได้อย่างแม่นยำ ( $R^2 = 0.961 - 0.990$ ) เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์ พบว่า ระยะพัก และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 – 1.3 วัน และ 11.7 – 72.4 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน ตามลำดับ ทั้งนี้ฟางข้าวที่มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดคือ ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (72.4 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน) รองลงมาคือ ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (70.2 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน) ส่วนฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดต่ำที่สุด (11.7 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน)

58311305 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : RICE STRAW, LIGNOCELLULOSIC MATERIALS, PRETREATMENT, CALCIUM HYDROXIDE,  
BIOCHEMICAL METHANE POTENTIAL

MISS WITTHAYAPORN KONGYOO : INFLUENCE OF PRETREATMENT WITH  
CALCIUM HYDROXIDE ON BIOGAS PRODUCTION FROM RICE STRAW THESIS ADVISOR :  
DAOROONG SUNGTHONG, Ph.D.

In this research, the pretreatment of rice straw under the different pretreatment conditions, including the pretreatment with calcium hydroxide concentrations of 5%, 10% and 15% for 3, 6 and 12 days at room temperature, and the pretreatment with calcium hydroxide concentrations of 5%, 10% and 15% at temperature levels of 70, 80 and 90 degree Celsius for 2 hours, leading to a total number of 18 pretreatment conditions, was carried out. Then, the methane potential of the untreated rice straw and all 18 samples of the pretreated rice straws were investigated using the biochemical methane potential (BMP) test. Additionally, a modified Gompertz equation was applied to describe the kinetics of methane productions from the untreated rice straw and the individually pretreated rice straws processed by different pretreatment conditions. Based on the BMP experimental results, they indicate that both untreated and pretreated rice straws exhibited the potential to produce methane gas. However, all the pretreated rice straws processed by different pretreatment conditions acquired the cumulative methane yield, of over 30 days, ranging from 265 to 310 NmL gVS<sup>-1</sup>, which were remarkably higher than the untreated rice straw (171 NmL gVS<sup>-1</sup>) by 55.0 to 81.3%. The highest cumulative methane yield was achieved with the pretreated rice straw processed by the pretreatment condition of 5% calcium hydroxide for 12 days at room temperature. Based on the kinetic analysis results, they show that the modified Gompertz equation was an appropriate model to predict the methane yield from the anaerobic digestion of rice straw. The model could accurately describe ( $R^2 = 0.961 - 0.990$ ) the experimental methane yields obtained from the BMP tests. According to the kinetic parameters, it shows that the duration of the lag phase and the maximum methane production rate varied within the range of 0.3 – 1.3 days, and 11.7 – 72.4 NmL gVS<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, respectively. The highest maximum methane production rate was estimated for the pretreated rice straw processed by the pretreatment condition of 10% calcium hydroxide for 6 days at room temperature (72.4 NmL gVS<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), followed by the pretreated rice straw processed by the pretreatment condition of 5% calcium hydroxide for 12 days at room temperature (70.2 NmL gVS<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), and the lowest was for the untreated rice straw (11.7 NmL gVS<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>).

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “อิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว (Influence of Pretreatment with Calcium Hydroxide on Biogas Production from Rice Straw)” นอกจากได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560 แล้ว ยังได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ด้วย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ดาวรุ่ง สังข์ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและข้อแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์นี้ทุกขั้นตอน ตั้งแต่การวางแผนงานวิจัย การดำเนินการศึกษาวิจัย หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินการศึกษาวิจัย ด้วยความทุ่มเทอุตสาหะ เอาใจใส่ รวมถึงเป็นแรงผลักดัน และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้อย่างเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องอื่น ๆ อีก ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจริญไชยศรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมกับได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมถึงชี้แนะข้อบกพร่อง ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.วิภาวรรณ เล้าอรุณ ที่เมตตาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ขอขอบคุณ พี่นที สงบุญ และพี่ผ่องศรี เผ่าภูรี ที่ช่วยอำนวยความสะดวก ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณ บริษัท โรงเส้นหมี่ช่อเอง จำกัด จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการนำตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบบยูเอเอสบีมาใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยสนับสนุนและอยู่เคียงข้างตลอดมา และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการสนับสนุนการทำวิจัยนี้ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

วิทยากรณ์ คงอยู่

## สารบัญ

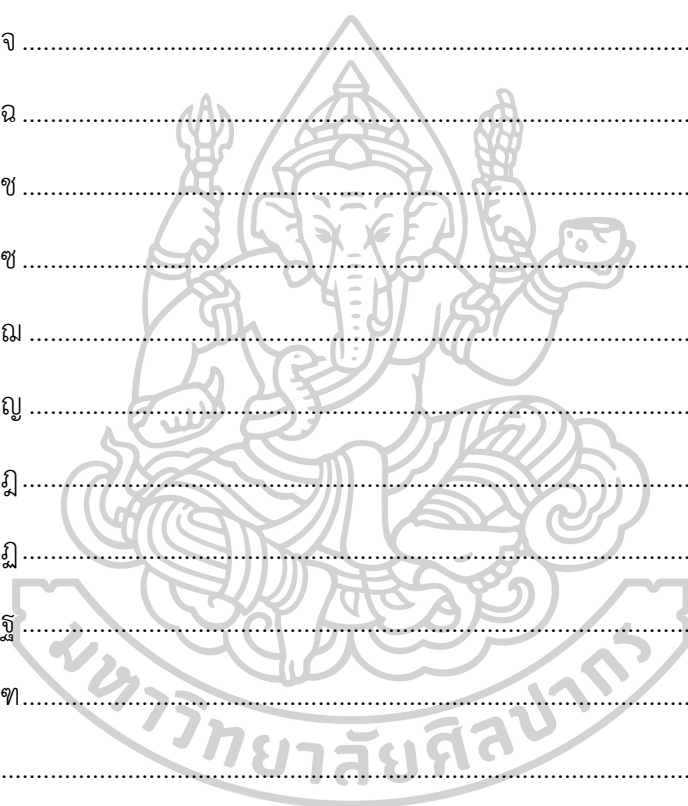
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	5
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร.....	7
2.1 ปრაกฏการณ์เรือนกระจก.....	7
2.1.1 ประเภทของก๊าซเรือนกระจก.....	7
2.1.2 สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก.....	9
2.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทน.....	12
2.2.1 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ.....	13
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทน.....	16
2.2.3 วัสดุตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน.....	19
2.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.....	20



2.3.1	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน .....	21
2.3.2	จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายเพื่อผลิตก๊าซมีเทน .....	24
2.4	วัสดุลิกโนเซลลูโลส .....	25
2.4.1	องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของวัสดุลิกโนเซลลูโลส .....	26
2.4.2	สมบัติของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ .....	35
2.5	ฟางข้าว .....	40
2.6	การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส .....	41
2.6.1	การปรับสภาพทางกายภาพ .....	42
2.6.2	การปรับสภาพทางเคมี .....	45
2.6.3	การปรับสภาพทางชีวภาพ .....	48
2.6.4	การปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสาน .....	51
บทที่ 3	วิธีดำเนินการทดลอง .....	54
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	54
3.1.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียมและการปรับสภาพฟางข้าว .....	54
3.1.2	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ฟางข้าว .....	54
3.1.3	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน .....	54
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา .....	55
3.2.1	สารเคมีสำหรับการปรับสภาพฟางข้าว .....	55
3.2.2	สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ฟางข้าว .....	55
3.2.3	สารเคมีสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว .....	55
3.3	ฟางข้าวที่ใช้ในการศึกษา .....	56
3.4	การเตรียมตัวอย่างฟางข้าว .....	56
3.5	การปรับสภาพฟางข้าว .....	57
3.6	การวิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว .....	58

3.7 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี .....	59
3.8 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว .....	63
3.9 การศึกษาปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว 63	
3.10 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	64
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา.....	67
4.1 สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว .....	67
4.1.1 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว .....	67
4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว .....	81
4.1.3 สัณฐานวิทยาของฟางข้าว .....	91
4.2 ปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว .....	93
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช .....	94
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นด่าง.....	100
4.2.3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหย .....	101
4.2.4 การเปลี่ยนแปลงผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน .....	102
4.2.5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลาย .....	103
4.2.6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว.....	104
4.3 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี .....	108
4.4 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี .....	116
4.5 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี .....	139
4.6 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว.....	149
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	152
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	152
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	155

รายการอ้างอิง .....	157
ภาคผนวก.....	175
ภาคผนวก ก .....	176
ภาคผนวก ข .....	181
ภาคผนวก ค .....	201
ภาคผนวก ง.....	211
ภาคผนวก จ .....	213
ภาคผนวก ฉ .....	217
ภาคผนวก ช .....	222
ภาคผนวก ซ .....	238
ภาคผนวก ฌ .....	241
ภาคผนวก ญ .....	244
ภาคผนวก ณ .....	262
ภาคผนวก น .....	268
ภาคผนวก ด .....	271
ภาคผนวก ต .....	277
ประวัติผู้เขียน.....	283



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกและระยะเวลาที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ .....	9
ตารางที่ 2.2 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามภาคการปล่อยของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2543 .....	11
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ .....	13
ตารางที่ 2.4 ปฏิบัติการย่อยสลายเพื่อผลิตกรดอะซิติก .....	15
ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุอินทรีย์ .....	18
ตารางที่ 2.6 สัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ .....	27
ตารางที่ 2.7 หน่วยย่อยและโครงสร้างของหน่วยย่อยที่มักพบในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส .....	31
ตารางที่ 2.8 ปริมาณชีวมวลในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556 .....	41
ตารางที่ 3.1 สภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ .....	57
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ และองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว .....	58
ตารางที่ 3.3 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาในการทดลองแต่ละเขต .....	60
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว .....	64
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว .....	68
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ .....	80
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว .....	83
ตารางที่ 4.4 ปริมาณเซลลูโลสในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ .....	85
ตารางที่ 4.5 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ .....	87
ตารางที่ 4.6 ปริมาณลิกนินในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ .....	89

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญบางประการตามระยะเวลาการย่อยสลายในชุดการทดลองแต่ละชุด .....	95
ตารางที่ 4.8 ปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว ก่อนและหลังการย่อยสลาย	105
ตารางที่ 4.9 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 1).....	109
ตารางที่ 4.10 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 2).....	110
ตารางที่ 4.11 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 3).....	111
ตารางที่ 4.12 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 4).....	112
ตารางที่ 4.13 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 5).....	113
ตารางที่ 4.14 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 1).....	117
ตารางที่ 4.15 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 2).....	118
ตารางที่ 4.16 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 3).....	119
ตารางที่ 4.17 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 4).....	120
ตารางที่ 4.18 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 5).....	121
ตารางที่ 4.19 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 1).....	125
ตารางที่ 4.20 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 2).....	126



ตารางที่ 4.34 พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลาย ฟางข้าวที่สภาวะมาตรฐานโดยใช้สมการ Modified Gompertz.....	154
ตารางที่ ก.1 สภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง.....	179
ตารางที่ ก.2 สภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง .....	180
ตารางที่ จ.1 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์.....	215
ตารางที่ ซ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว.....	239
ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว.....	242
ตารางที่ ญ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช.....	245
ตารางที่ ญ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่าง.....	246
ตารางที่ ญ.3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหย.....	249
ตารางที่ ญ.4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียในไนโตรเจนและ แอมโมเนียไนโตรเจน.....	252
ตารางที่ ญ.5 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลาย.....	255
ตารางที่ ญ.6 ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และ ของแข็งคงตัว.....	258
ตารางที่ ฎ.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 1).....	263
ตารางที่ ฎ.2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 2).....	264
ตารางที่ ฎ.3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 3).....	265
ตารางที่ ฎ.4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 4).....	266
ตารางที่ ฎ.5 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 5).....	267





ตารางที่ ๗.4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่  
 สภาวะมาตรฐาน (เซตที่ 4)..... 281

ตารางที่ ๗.5 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่  
 สภาวะมาตรฐาน (เซตที่ 5)..... 282



## สารบัญภาพ

## หน้า

ภาพที่ 2.1. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลกระหว่างปี พ.ศ. 2513 – 2553.....	10
ภาพที่ 2.2. กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ .....	14
ภาพที่ 2.3. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	17
ภาพที่ 2.4. อัตราการย่อยสลายเพื่อผลิตก๊าซมีเทนจากวัสดุตั้งต้นต่าง ๆ.....	20
ภาพที่ 2.5. โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	28
ภาพที่ 2.6. พันธะไฮโดรเจนของโครงสร้างเซลลูโลส.....	29
ภาพที่ 2.7. โครงสร้างเซลลูโลสในเซลล์พืช.....	30
ภาพที่ 2.8. โครงสร้างไซแลนในไม้เนื้อแข็งและหญ้า.....	32
ภาพที่ 2.9. โครงสร้างกาเล็กโทกลูโคแมนแนนในไม้เนื้ออ่อน.....	32
ภาพที่ 2.10. หน่วยย่อยโครงสร้างหลักของลิกนิน .....	33
ภาพที่ 2.11. โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน.....	34
ภาพที่ 2.12. โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้อแข็ง.....	35
ภาพที่ 2.13. องค์ประกอบภายในผนังเซลล์พืชแยกตามส่วนต่าง ๆ .....	40
ภาพที่ 3.1. ฟางข้าวอัดก้อนที่นำมาใช้ในการศึกษา.....	56
ภาพที่ 3.2. ลักษณะเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท โรงเส้นหมี่ขอสง จำกัด59	
ภาพที่ 3.3. ขวดหมักที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน .....	61
ภาพที่ 3.4. ชุดการวัดปริมาณก๊าซมีเทนโดยใช้หลักการแทนที่ด้วยต่างและน้ำ.....	62
ภาพที่ 4.1. การเปรียบเทียบปริมาณของแข็งรวมในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.....	69
ภาพที่ 4.2. การเปรียบเทียบปริมาณของแข็งระเหยในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ .....	71
ภาพที่ 4.3. การเปรียบเทียบปริมาณเถ้าในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ .....	73
ภาพที่ 4.4. การเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ .....	74
ภาพที่ 4.5. การเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนรวมในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ .....	76

ภาพที่ 4.6. การเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสรวมในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.....	77
ภาพที่ 4.7. การเปรียบเทียบปริมาณซีโอดีในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ .....	79
ภาพที่ 4.8. การเปรียบเทียบอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ .....	80
ภาพที่ 4.9. การเปรียบเทียบปริมาณสารแทรกในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ .....	84
ภาพที่ 4.10. การเปรียบเทียบปริมาณเซลลูโลสในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ .....	86
ภาพที่ 4.11. การเปรียบเทียบปริมาณเฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ .....	88
ภาพที่ 4.12. การเปรียบเทียบปริมาณลิกนินในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ .....	91
ภาพที่ 4.13. ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ .....	92
ภาพที่ 4.14. การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตามระยะเวลาการย่อยสลาย.....	94
ภาพที่ 4.15. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตามระยะเวลาการย่อยสลาย .....	101
ภาพที่ 4.16. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยตามระยะเวลาการย่อยสลาย.....	102
ภาพที่ 4.17. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนีย ไนโตรเจนตามระยะเวลาการย่อยสลาย .....	103
ภาพที่ 4.18. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลายตามระยะเวลาการย่อยสลาย.....	104
ภาพที่ 4.19. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวมก่อนและหลังการย่อยสลาย .....	106
ภาพที่ 4.20. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งระเหยก่อนและหลังการย่อยสลาย .....	107
ภาพที่ 4.21. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งคงตัวก่อนและหลังการย่อยสลาย .....	107
ภาพที่ 4.22. ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส .....	114
ภาพที่ 4.23. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส .....	122
ภาพที่ 4.24. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศา เซลเซียส.....	130
ภาพที่ 4.25. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน .....	137
ภาพที่ 4.26. ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน .....	145

ภาพที่ 4.27. ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวที่สภาวะมาตรฐาน ..... 147

ภาพที่ 4.28. ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน ..... 147

ภาพที่ 4.29. การเปรียบเทียบปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ กับผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน ..... 148

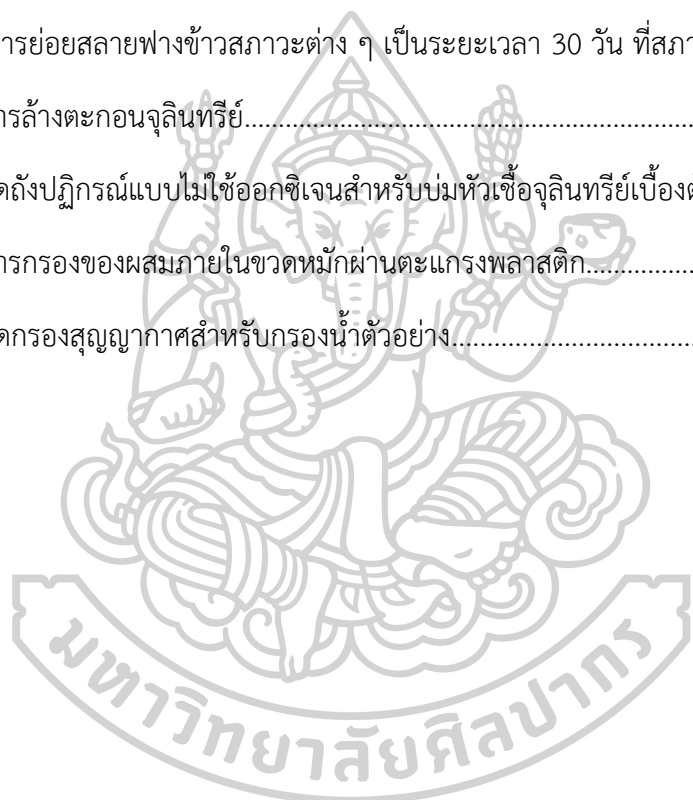
ภาพที่ 4.30. การเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน ..... 152

ภาพที่ จ.1. การล้างตะกอนจุลินทรีย์.....215

ภาพที่ จ.2. ชุดถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น .....216

ภาพที่ ข.1. การกรองของผสมภายในขวดหมักผ่านตะแกรงพลาสติก.....224

ภาพที่ ข.2. ชุดกรองสุญญากาศสำหรับกรองน้ำตัวอย่าง..... 224



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) จากการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เข้าสู่บรรยากาศ จัดเป็นสาเหตุสำคัญที่นำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) และจากการที่ก๊าซเรือนกระจกทำให้กระบวนการรับและสะท้อนกลับของรังสีความร้อนในชั้นบรรยากาศเกิดความไม่สมดุล จึงทำให้มีพลังงานความร้อนเกิดสะสมอยู่บนพื้นผิวโลกและในบรรยากาศมากขึ้น และส่งผลให้เกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate changes) ได้ ในที่สุด

จากข้อมูลในรายงานผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) ปี พ.ศ. 2557 ระบุว่าปี พ.ศ. 2553 ทั่วโลกมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์รวม 49 พันล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Gt CO<sub>2</sub>-eq) โดยก๊าซเรือนกระจกหลัก ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil fuels) ซึ่งมีปริมาณมากถึง 32 พันล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015) และจากข้อมูลการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ในรายงานแห่งชาติฉบับที่ 2 พ.ศ. 2553 พบว่าปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 229.09 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Mt CO<sub>2</sub>-eq) ในจำนวนนี้ภาคพลังงานเป็นภาคที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 69.6 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งประเทศ โดยมีกลุ่มการปล่อยหลักมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์คิดเป็นปริมาณ 154.17 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์จัดเป็นกิจกรรมสำคัญของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นการจัดหาพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์จึงเป็นแนวทางที่สำคัญแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ปัจจุบันพลังงานทดแทนประเภทพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เป็นพลังงานที่ได้รับความนิยมเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ เนื่องจากเป็นพลังงานที่

ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานคลื่น พลังงานใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล เป็นต้น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2554; Søndergaard, Fotidis, Kovalovszki, & Angelidaki, 2015) และในบรรดาแหล่งพลังงานหมุนเวียนทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น พลังงานชีวมวล (Bioenergy) จัดเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ได้ เนื่องจากพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนชีวมวล (Biomass) ให้อยู่ในรูปของพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น ความร้อน ไอน้ำ ไฮโดรเจน เอทานอล และก๊าซชีวภาพ เป็นต้น (Fernández-Cegri, Raposo, Angeles De la Rubia, & Borja, 2012; Zhong et al., 2011) นอกจากนี้การใช้พลังงานชีวมวลยังเป็นการหมุนเวียนของคาร์บอนแบบระบบปิด (Closed carbon cycle) กล่าวคือ เมื่อมีการเพาะปลูกชีวมวลในปริมาณที่เทียบเท่ากับปริมาณที่มีการนำมาใช้เป็นพลังงานชีวมวล ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการใช้พลังงานจะถูกดูดซับผ่านการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อการเจริญเติบโตของชีวมวลเหล่านั้น จึงถือได้ว่าการใช้พลังงานจากชีวมวลไม่ได้ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มขึ้น (Matthews & Robertson, 2005)

ด้วยเหตุที่ประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีแหล่งทรัพยากรชีวมวลที่เป็นส่วนเหลือทิ้งจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว ใบและยอดอ้อย ชานอ้อย ยอด ใบและลำต้นข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งพบว่าปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทยมีชีวมวลเหลือทิ้งประเภทต่าง ๆ รวมกันถึง 62 ล้านตัน จึงถือได้ว่าประเทศไทยมีปริมาณชีวมวลที่มีศักยภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้ฟางข้าว (Rice straw) เป็นชีวมวลที่มีปริมาณเหลือทิ้งมากถึง 10 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 17 ของชีวมวลเหลือทิ้งทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) อย่างไรก็ตามการนำฟางข้าวมาใช้เพื่อผลิตพลังงานยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยี ส่งผลให้ฟางข้าวส่วนใหญ่ถูกกำจัดโดยการเผาทิ้งในไร่นาก่อให้เกิดความเสื่อมโทรมของดิน สร้างมลภาวะทางอากาศ และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อใช้ประโยชน์จากฟางข้าวอย่างมีประสิทธิภาพ ที่มีค่าลงทุนและค่าดำเนินการต่ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ของชีวมวลส่วนเหลือทิ้งจากการทำเกษตรกรรมเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีหนึ่งในการผลิตพลังงานจากชีวมวลเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ซึ่งมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย (Murphy & Power, 2009) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวยังมีข้อจำกัดอยู่ เนื่องจากฟางข้าวจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ทำให้ฟางข้าวมีความคงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ สารประกอบที่ละลายได้ง่าย และมีมวลโมเลกุลต่ำซึ่งเป็นอาหารของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงมีปริมาณไม่เพียงพอ

(Taherzadeh & Karimi, 2008) ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเกิดได้ช้า การปรับสภาพชีวมวลก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย เนื่องจากการปรับสภาพสามารถย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้อยู่รูปที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น และเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก (Ferreira, Donoso-Bravo, Nilsen, Fdz-Polanco, & Pérez-Elvira, 2013; Teghammar, Yngvesson, Lundin, Taherzadeh, & Horváth, 2010) ซึ่งโดยทั่วไปวิธีการปรับสภาพสามารถแบ่งออกได้เป็นวิธีทางกายภาพ (Fernández-Cegri et al., 2012; Sapci, 2013) วิธีทางเคมี (Cao, Sun, Liu, Yin, & Wu, 2012; Michalska, Miazek, Krzystek, & Ledakowicz, 2012; M. Zheng, Li, Li, Yang, & He, 2009; Zhu, Wan, & Li, 2010) วิธีทางชีวภาพ และวิธีผสมผสานของวิธีต่าง ๆ (Chandra, Takeuchi, Hasegawa, & Kumar, 2012; Q. Zhang, Tang, Zhang, Mao, & Jiang, 2011) และเมื่อเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพแบบต่าง ๆ ดังกล่าว พบว่า วิธีทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการปรับสภาพ เนื่องจากมีราคาถูก และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุลิกโนเซลลูโลสได้ดี ตัวอย่างเช่น การศึกษาของ Song, Yang, Guo, and Zhang (2012) พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และมีปริมาณผลผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 225.3 มิลลิลิตรต่อกรัมของแห้งระเหย เมื่อผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 9.81 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5.89 วัน และจากการศึกษาของ Fernández-Cegri et al. (2012) พบว่า กากตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำมันดอกทานตะวันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) 130 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดี ซึ่งสูงกว่าในกากตะกอนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึงร้อยละ 25

ด้วยเหตุนี้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) ของฟางข้าว ก่อนที่จะนำฟางข้าวเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ซึ่งในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้มุ่งความสนใจหลักไปที่การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาว ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีสมบัติเป็นด่างในการปรับสภาพฟางข้าว เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการเพิ่มความสามารถการย่อยสลาย มีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ปลอดภัยต่อการใช้งาน และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับคืนแคลเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำได้ โดยการสะเทินกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นนำไปป้อนกลับเข้าเตาเผาปูนขาว (Lime kiln) เพื่อผลิตซ้ำ (Regenerate) เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์อีกครั้งหนึ่ง (Kumar, Barrett, Delwiche, & Stroeve, 2009)

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีสมบัติเป็นด่างในการปรับสภาพฟางข้าว และนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการบวกรวมการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ของแข็งรวม (Total solids) ของแข็งระเหย (Volatile solids) เถ้า (Ash or Fixed solids) อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ไนโตรเจนรวม (Total nitrogen) ฟอสฟอรัสรวม (Total phosphorus) ซีโอดี (Chemical oxygen demand) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N ratio)

1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin)

1.2.3 เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ

1.2.4 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช (pH) ความเป็นด่าง (Alkalinity) กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids) ผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonium nitrogen + ammonia nitrogen) ซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand) ของแข็งรวม (Total solids) ของแข็งระเหย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids) ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical methane potential, BMP)

1.2.5 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน จากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยวิธีบีเอ็มพี

1.2.6 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยสมการ Modified Gompertz

1.2.7 เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา และอุณหภูมิการปรับสภาพฟางข้าวที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน จากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน



### 1.3 สมมติฐานการศึกษา

ศักยภาพของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในแต่ละสภาวะมีความแตกต่างกัน โดยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง มีระยะเวลาการปรับสภาพนาน หรือที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ฟางข้าวมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงขึ้น เนื่องจากฟางข้าวมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนน้อยลงและเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในการบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ

### 1.4 ขอบเขตการศึกษา

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว โดยปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ได้แก่ ร้อยละ 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) และแต่ละความเข้มข้นใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพแตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา ได้แก่ 3 6 และ 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) และแต่ละความเข้มข้นใช้อุณหภูมิในการปรับสภาพแตกต่างกัน 3 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยวิธี Biochemical methane potential (BMP) โดยดำเนินการทดลองแบบแบตช์ (Batch experiments)

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทราบถึงสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ ลักษณะสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าวที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ

1.5.2 ทราบถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ความเป็นต่าง กรดไขมันระเหย ผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน และซีโอติละลาย รวมถึงปริมาณของแข็งรวมของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว ในกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีบีเอ็มพี

1.5.3 ทราบถึงปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีบีเอ็มพี

1.5.4 ทราบถึงพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยสมการ Modified Gompertz

1.5.5 ทราบความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา และอุณหภูมิของการปรับสภาพฟางข้าวที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน จากการเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ



## บทที่ 2

### การตรวจสอบเอกสาร

#### 2.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก

โดยปกติเมื่อรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ส่งมายังโลก ชั้นบรรยากาศโลกจะกรองรังสีคลื่นสั้นบางชนิดไม่ให้ผ่านเข้ามาตกกระทบพื้นผิวโลก สำหรับรังสีคลื่นสั้นที่ผ่านเข้ามาตกกระทบบนพื้นผิวโลกบางส่วนจะสะท้อนกลับออกนอกชั้นบรรยากาศไป และอีกส่วนที่ยังคงเหลืออยู่บนพื้นผิวโลกจะคายพลังงานออกมาเป็นรังสีคลื่นยาวหรือรังสีอินฟราเรดออกนอกชั้นบรรยากาศและมีส่วนหนึ่งที่ทำให้บรรยากาศดูดซับไว้ แล้วค่อย ๆ คายเป็นพลังงานความร้อนออกมาให้ความอบอุ่นแก่โลก แต่เมื่อมีปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases, GHGs) มากขึ้น ก๊าซเรือนกระจกจะทำให้กระบวนการรับและสะท้อนกลับของรังสีความร้อนในชั้นบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไป โดยก๊าซเรือนกระจกจะเก็บกักรังสีคลื่นยาวเอาไว้ไม่ให้ผ่านออกนอกชั้นบรรยากาศ และสะท้อนกลับมายังพื้นโลกอีกครั้ง ส่งผลให้ปริมาณความร้อนถูกสะท้อนกลับมายังพื้นผิวโลกมากขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ทำให้อุณหภูมิบรรยากาศโลกสูงขึ้น และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) ในที่สุด การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์เป็นสาเหตุสำคัญทำให้ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าปี พ.ศ. 2543 – 2553 เป็นช่วงที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอดีตและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สมชัย บวรกิตติ, 2558; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015)

##### 2.1.1 ประเภทของก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซที่จัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเรือนกระจกซึ่งพบอยู่ในบรรยากาศมีทั้งก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและก๊าซที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน เป็นต้น แต่ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต (Kyoto protocol) ซึ่งเป็นพิธีสารภายใต้อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nation Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) ได้กำหนดประเภทของก๊าซเรือนกระจกที่มีแหล่งกำเนิดมาจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญ 6 ชนิด (พัชรี แสงจันทร์, 2554; สมชัย บวรกิตติ, 2558; สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) ดังต่อไปนี้

### 2.1.1.1 คาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดความร้อนสะสมในชั้นบรรยากาศโลกมากที่สุดเมื่อเทียบกับก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่น ๆ เกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้ต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์เพื่อใช้เป็นพลังงานและใช้ในการขนส่ง การเผาป่าเพื่อใช้พื้นที่ทำการเกษตร และการเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น

### 2.1.1.2 มีเทน

ก๊าซมีเทน (Methane, CH<sub>4</sub>) เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สร้างผลกระทบเป็นอันดับสองรองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ติดไฟได้ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของก๊าซธรรมชาติ โดยแหล่งกำเนิดของก๊าซมีเทนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น จากการทำนาข้าว การสูญเสียก๊าซและน้ำมันจากท่อส่ง การปล่อยก๊าซจากหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย และการปศุสัตว์ เป็นต้น

### 2.1.1.3 ไนตรัสออกไซด์

ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide, N<sub>2</sub>O) เป็นก๊าซที่มีแหล่งกำเนิดสำคัญมาจากอุตสาหกรรมที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกบางชนิด เป็นต้น ซึ่งไนตรัสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมดังกล่าวมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มพลังงานความร้อนสะสมบนพื้นผิวโลก

### 2.1.1.4 ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน

ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbon, HFCs) เป็นก๊าซที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็น เช่น เครื่องปรับอากาศ และตู้เย็น รวมทั้งใช้เป็นสารขยายตัวของโฟม และใช้เป็นส่วนประกอบของสารดับเพลิง เป็นต้น

### 2.1.1.5 เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน

เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbon, PFCs) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมหลอมอลูมิเนียมและการผลิตสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า การปล่อยก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอนสู่บรรยากาศแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดภาวะโลกร้อนได้ เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนสูง โดยมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) ในระยะ 100 ปี มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ 11,100 เท่า และสามารถอยู่ในชั้นบรรยากาศนานสูงสุดถึง 50,000 ปี (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013) ดังตารางที่ 2.1

### 2.1.1.6 ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur hexafluoride, SF<sub>6</sub>) เป็นก๊าซที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมแมกนีเซียม อุตสาหกรรมผลิตฉนวนไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น ก๊าซชนิดนี้เป็นก๊าซที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงที่สุดคือมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนในระยะ 100 ปี มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ 23,500 เท่า และสามารถอยู่ในชั้นบรรยากาศได้นาน 3,200 ปี (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกและระยะเวลาที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ

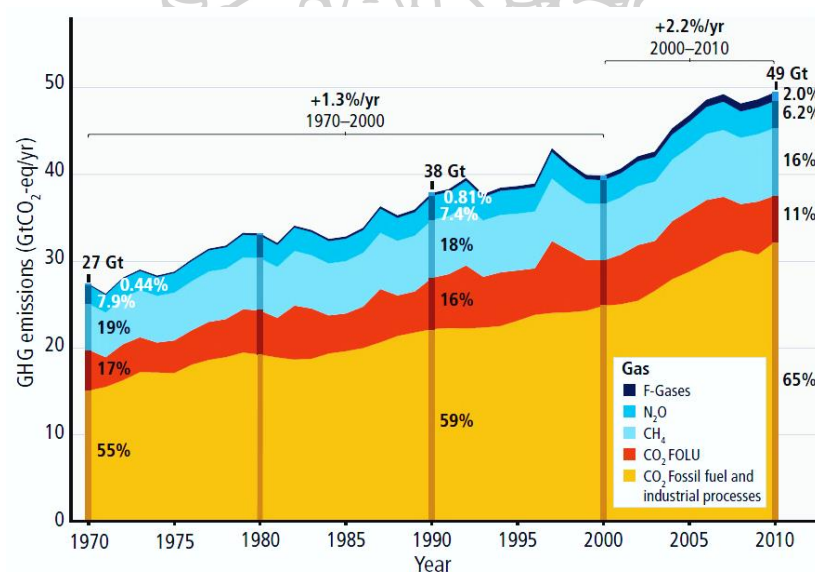
ชนิดก๊าซเรือนกระจก	ระยะเวลา ในชั้นบรรยากาศ (ปี)	ค่าศักยภาพในการก่อให้เกิด ภาวะโลกร้อน (GWP) ในช่วง ระยะเวลา 100 ปี
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	200	1
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	8.4 – 12	23
ไนตรัสออกไซด์ (N <sub>2</sub> O)	114 – 120	296
เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs)		
- เพอร์ฟลูออโรอีเทน (CF <sub>4</sub> )	50,000	6,630
- เฮกซะฟลูออโรอีเทน (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	10,000	11,100
ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs)		
- HFC-1243zf (CF <sub>3</sub> CHCH <sub>2</sub> )	7.0 วัน	<1
- HFC-1345zfc (C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> CHCH <sub>2</sub> )	7.6 วัน	<1
ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF <sub>6</sub> )	3,200	23,500

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก *Climate change 2013: The physical science basis* (น. 731-738), โดย Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, United States of America: Cambridge University Press. ลิขสิทธิ์ 2013 โดย Intergovernmental Panel on Climate Change.

### 2.1.2 สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จากรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ปี พ.ศ.

2557 พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยระหว่างปี พ.ศ. 2513 – 2543 (ค.ศ. 1970 – 2000) มีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.3 ต่อปี และระหว่างปี พ.ศ. 2543 – 2553 (ค.ศ. 2000 – 2010) มีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.2 ต่อปี ซึ่งในระหว่างปี พ.ศ. 2543 – 2553 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นถึง 10 พันล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยในปี พ.ศ. 2553 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 49 พันล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกจำนวนนี้เป็นการปล่อยจากภาคพลังงานร้อยละ 35 จากภาคเกษตรกรรม การใช้ที่ดินและป่าไม้ร้อยละ 24 จากอุตสาหกรรมร้อยละ 21 จากการขนส่งร้อยละ 14 และจากการก่อสร้างร้อยละ 6.4 และพบว่าร้อยละ 78 ของก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยสู่บรรยากาศในระหว่างปี พ.ศ. 2513 – 2553 คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งในปี พ.ศ. 2553 มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 32 พันล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015)



ภาพที่ 2.1. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลกระหว่างปี พ.ศ. 2513 – 2553.

ปรับปรุงจาก *Climate change 2014: Synthesis report* (น. 5), โดย Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. ลิขสิทธิ์ 2015 โดย Intergovernmental Panel on Climate Change.

สำหรับปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2543 มีปริมาณรวมทั้งส่วนที่ปล่อยและส่วนที่ดูดกลับเท่ากับ 229.08 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) ดังตารางที่ 2.2 และจาก

แหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 5 ภาค ได้แก่ ภาคพลังงาน ภาคกระบวนการอุตสาหกรรม ภาคการเกษตร ภาคการเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่และป่าไม้ และภาคของเสีย พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคพลังงานมากที่สุดคือ 159.39 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คิดเป็นร้อยละ 69.5 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของประเทศ โดยมีการปล่อยหลักมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 154.17 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า หรือคิดเป็นร้อยละ 96.73 ของการปล่อยทั้งหมดของภาคพลังงาน รองลงมาคือภาคการเกษตร ภาคกระบวนการอุตสาหกรรม และภาคของเสีย ตามลำดับ ส่วนภาคการเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่และป่าไม้มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าปริมาณดูดกลับทำให้มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ -7.89 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามภาคการปล่อยของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2543

ภาคการปล่อย	ปริมาณการปล่อยรวม (Mt CO <sub>2</sub> -eq)	ร้อยละการปล่อย
ภาคพลังงาน	159.39	69.6
ภาคกระบวนการอุตสาหกรรม	16.39	7.2
ภาคการเกษตร	51.88	22.6
ภาคการเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่และป่าไม้	-7.89	-3.4
ภาคของเสีย	9.32	4.1
รวม	229.09	100

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก รายงานฉบับสมบูรณ์ การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย (รายงานแห่งชาติฉบับที่ 2) (น. จ), โดย สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553, กรุงเทพฯ: สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าภาคพลังงานเป็นภาคที่มีความสำคัญมากต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากเป็นแหล่งที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด โดยกิจกรรมของมนุษย์ที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคพลังงานเกิดจากการใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Fuel combustion) เช่น การใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การกลั่นน้ำมัน การขนส่ง อุตสาหกรรม หรือภายในครัวเรือน เป็นต้น และอีกส่วนเกิดจากการรั่วไหลของก๊าซเรือนกระจก (Fugitive emissions) จากกระบวนการผลิตต่าง ๆ

เช่น การขุดเจาะน้ำมัน การขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ การทำเหมืองถ่านหิน เป็นต้น (สมชัย บวรกิตติ, 2558) นอกจากนี้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคพลังงานยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการจัดการพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนประเภทหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการบรรเทาปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากพลังงานชีวมวลมีการปล่อยมลพิษต่ำหาได้ง่าย สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ แต่ทั้งนี้การเปลี่ยนชีวมวลเพื่อเป็นพลังงานชีวมวลต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพ และความยั่งยืนของชีวมวลที่นำมาใช้ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015)

## 2.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทน

ก๊าซชีวภาพเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) โดยก๊าซชีวภาพดังกล่าวเป็นก๊าซผสม ซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน (Methane, CH<sub>4</sub>) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) เป็นส่วนใหญ่ และมีปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen, N<sub>2</sub>) ไฮโดรเจน (Hydrogen, H<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H<sub>2</sub>S) แอมโมเนีย (Ammonia, NH<sub>3</sub>) และออกซิเจน (Oxygen, O<sub>2</sub>) เพียงเล็กน้อย (Cheng, 2010) ซึ่งองค์ประกอบและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้น กระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้น และการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2012) สำหรับองค์ประกอบและสัดส่วนโดยทั่วไปของก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.3

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ จุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้อากาศจะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ให้เป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักที่สามารถติดไฟได้คือ ก๊าซมีเทน (ร้อยละ 50 – 80) โดยการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของก๊าซมีเทนปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร จะสามารถผลิตความร้อนได้ถึง 8,570 กิโลแคลอรี และความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซมีเทนนี้ยังมีศักยภาพสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย (J. J. Cheng, 2010) นอกจากนี้การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในระบบปิดยังเป็นเป็นการกักเก็บก๊าซมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และใช้ประโยชน์จากก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเพื่อการผลิตพลังงาน ช่วยลดการปล่อยก๊าซมีเทนที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะธรรมชาติสู่บรรยากาศ เช่น จากหลุมฝังกลบมูลฝอย หรือจากสิ่งแวดล้อมทั่วไปที่เป็นระบบเปิด เป็นต้น การผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงได้รับความนิยมสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งพลังงานที่มีความยั่งยืนและเป็นส่วนหนึ่งในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Y. Zheng, Zhao, Xu, & Li, 2014)



## ตารางที่ 2.3

### องค์ประกอบและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	สัดส่วน (ร้อยละ)
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	50 – 80
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	20 – 40
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	0 – 5
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	0 – 1.0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	0.05 – 1.0
แอมโมเนีย (NH <sub>3</sub> )	0.02 – 0.5
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	0 – 0.5

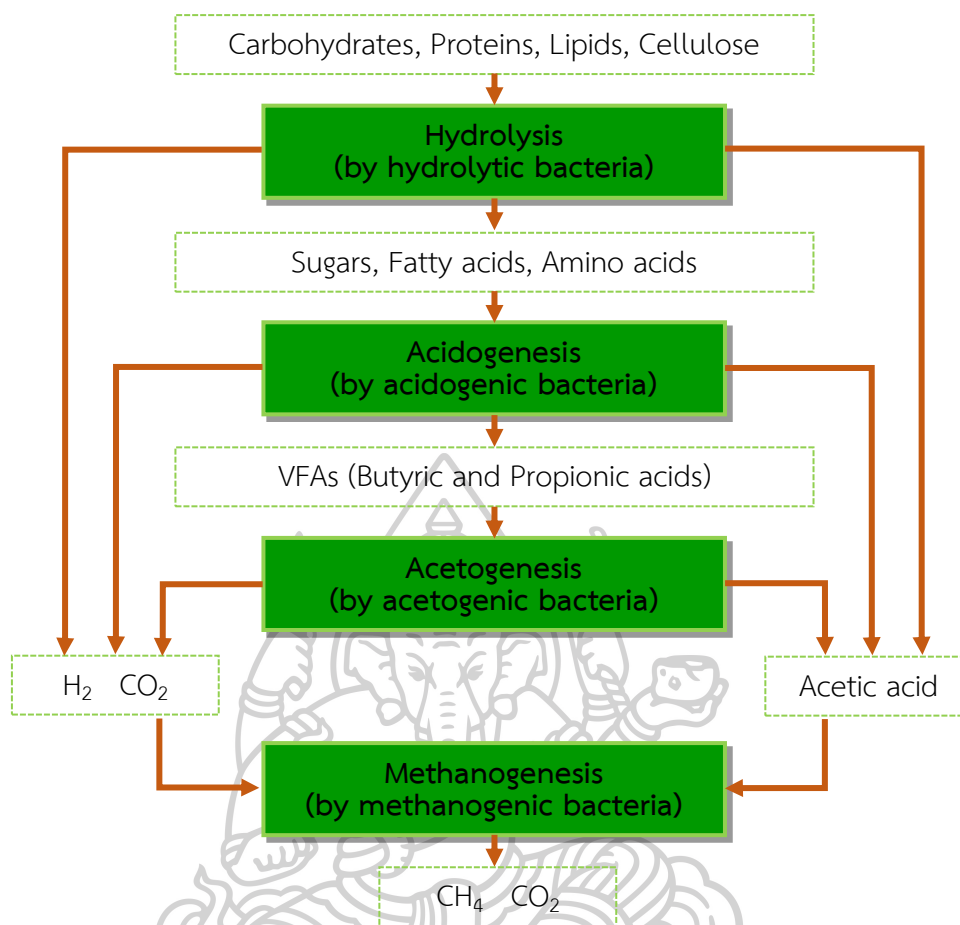
หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก Anaerobic digestion for biogas production. In J. J. Cheng (Ed.), *Biomass to Renewable Energy Process* (น. 152), โดย J. J. Cheng, 2010, United States of America: CRC Press. ลิขสิทธิ์ 2010 โดย Taylor and Francis Group.

### 2.2.1 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกอากาศ

การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกอากาศของสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ที่ค่อนข้างซับซ้อนและต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ต่อเนื่องกัน สำหรับขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การไฮโดรไลซิส การสร้างกรด การสร้างกรดอะซิติก และการสร้างมีเทน (J. J. Cheng, 2010; Deublein & Steinhauser, 2011) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

โดยทั่วไปสารอินทรีย์มักประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น แป้ง (Carbohydrates) โปรตีน (Proteins) ไขมัน (Lipids) และเซลลูโลส (Cellulose) เป็นต้น สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกไฮโดรไลซิสโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative bacteria) และจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligate anaerobic bacteria) จากการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ทำให้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อนมีขนาดโมเลกุลเล็กลง เช่น น้ำตาล (Sugars) กรดไขมัน (Fatty acids) กรดอะมิโน (Amino acids) และเปปไทด์ (Peptides) รวมทั้งกรดอะซิติก (Acetic acids) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 2.2. กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ.

ปรับปรุงจาก Anaerobic digestion for biogas production. In J. J. Cheng (Ed.), *Biomass to renewable energy process* (น. 155), โดย J. J. Cheng, 2010, United States of America: CRC Press. ลิขสิทธิ์ 2010 โดย Taylor and Francis Group.

### ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis)

สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กที่ผ่านการย่อยสลายมาจากขั้นตอนการไฮโดรไลซิสจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids, VFAs) เช่น กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก เป็นต้น และเช่นเดียวกับขั้นตอนการไฮโดรไลซิส คือในขั้นตอนการสร้างกรดก็จะมีการผลิตกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณเล็กน้อย

### ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ในขั้นตอนนี้กรดอินทรีย์ระเหยจากขั้นตอนที่ 2 จะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนบางส่วนยัง

เปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกในขั้นตอนนี้ด้วย ตัวอย่างปฏิกิริยาการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยเพื่อเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกเป็นดังตารางที่ 2.4

#### ตารางที่ 2.4

##### ปฏิกิริยาการย่อยสลายเพื่อผลิตกรดอะซิติก

สารตั้งต้น	ปฏิกิริยา
คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน	$2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$
กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$
กรดบิวทีริก (Butyric acid)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$
กรดวาเลอริก (Valeric acid)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2$
กรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric acid)	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COOH} + \text{HCO}_3\text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2$
กรดคาโปรอิก (Caproic acid)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COOH} + 5\text{H}_2$
กรีเซอริน (Glycerine)	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$
กรดแลกติก (Lactic acid)	$\text{CH}_3\text{CHOHCOOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$
เอทานอล (Ethanol)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก *Biogas from Waste and Renewable Resources* (น. 106), โดย D. Deublein and A. Steinhauser, 2011, Germany: Weinheim. ลิขสิทธิ์ 2011 โดย WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

#### ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศจะเสร็จสมบูรณ์เมื่อไฮโดรเจนและกรดอะซิติกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งสามารถแบ่งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Hydrogen-utilizing methane bacteria) โดยมีปฏิกิริยาดังสมการที่ 1 และกลุ่มจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Obligate acetic-utilizing anaerobic bacteria) ซึ่งจะเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ 2 โดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างมีเทนประมาณร้อยละ 70 เกิดจากการสร้างมีเทนของจุลินทรีย์กลุ่มใช้กรดอะซิติก



กลุ่มจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศคือ จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศเพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ โดยในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส ขั้นตอนการสร้างกรด และขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติก ประกอบด้วยการทำงานของจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ และกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น เช่น *Clostridium spp.*, *Peptococcus anaerobes*, *Lactobacillus*, *Actinomyces* และ *Escherichia coli*. เป็นต้น ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวจะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช อุณหภูมิ และสารยับยั้งต่าง ๆ แต่สำหรับจุลินทรีย์ที่อยู่ในขั้นตอนการสร้างมีเทน เป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตค่อนข้างช้า และเจริญเติบโตได้ในสภาวะแวดล้อมที่จำกัดคือ สามารถเจริญได้ในสภาวะไร้อากาศเท่านั้น และมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและสารยับยั้ง

สำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถสรุปขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังภาพที่ 2.2

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทน

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 2.2.2.1 แสง

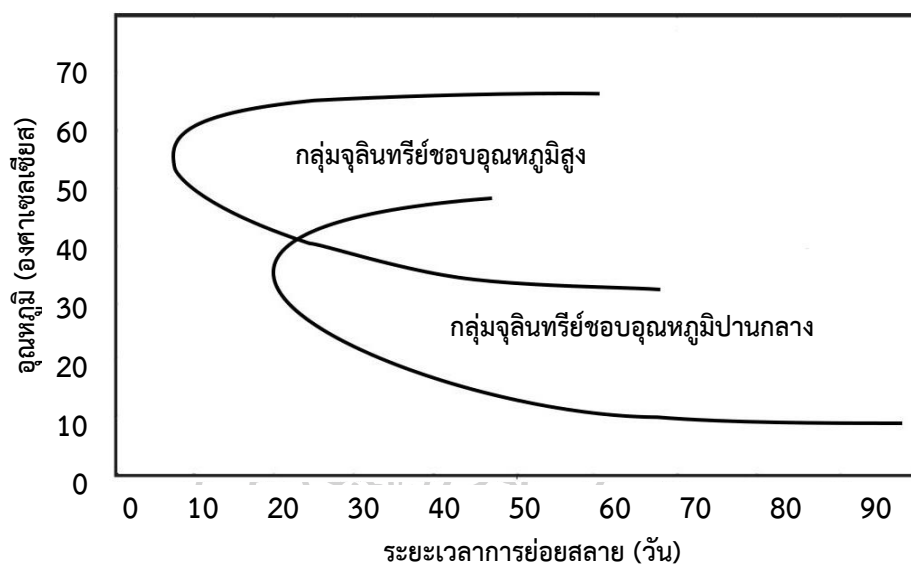
แสงไม่ได้มีผลกระทบร้ายแรงต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน แต่เป็นตัวยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นในกระบวนการหมักเพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นก๊าซมีเทนจึงควรดำเนินการในที่มืด (Deublein & Steinhauser, 2011)

#### 2.2.2.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบ่งตามการทำงานของจุลินทรีย์ออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิปานกลางคืออุณหภูมิระหว่าง 32 – 42 องศาเซลเซียส กลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้เรียกว่าจุลินทรีย์กลุ่มที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic microorganisms) และในช่วงอุณหภูมิสูงคืออุณหภูมิระหว่าง 48 – 55 องศาเซลเซียส โดยกลุ่มจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูง (Thermophilic microorganism) ดังภาพที่ 2.3

โดยทั่วไปจุลินทรีย์ในกระบวนการสร้างมีเทนคือ จุลินทรีย์กลุ่มที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เป็นจุลินทรีย์กลุ่มชอบอุณหภูมิสูง และมีจุลินทรีย์บางกลุ่มที่สามารถผลิตมีเทนได้ที่อุณหภูมิต่ำ (0.6 – 1.2 องศาเซลเซียส) เช่น บนพื้นผิวดินที่มีอุณหภูมิต่ำ (Permafrost) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนบางกลุ่มสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้คือที่อุณหภูมิ -11 องศาเซลเซียส (J. J. Cheng, 2010; Deublein & Steinhauser, 2011)

จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แม้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยก็สามารถเป็นสาเหตุทำให้กิจกรรมต่าง ๆ ภายในเซลล์จุลินทรีย์ลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการเดินระบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยอุณหภูมิต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิที่กำหนดเกินกว่า 2 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปมากกว่านี้จะทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลงถึงร้อยละ 30 (Deublein & Steinhauser, 2011)



ภาพที่ 2.3. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ.

ปรับปรุงจาก *Biogas from waste and renewable resources* (น. 124), โดย D. Deublein and A. Steinhauser, 2011, Germany: Weinheim. ลิขสิทธิ์ 2011 โดย WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

### 2.2.2.3 พีเอช

พีเอชเป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนคือค่าพีเอชระหว่าง 6.7 – 7.5 (Deublein & Steinhauser, 2011) แต่ในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้รวดเร็วจึงผลิตกรดอินทรีย์ได้ปริมาณมาก ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เติบโตได้ช้ากว่าเปลี่ยนกรดอินทรีย์เหล่านี้ให้เป็นมีเทนได้ไม่ทัน ทำให้ค่าพีเอชในระบบลดลง และอาจลดลงต่ำกว่า 6.5 ซึ่งหากค่าพีเอชต่ำกว่า 6.0 ก็จะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนถูกยับยั้ง (J. J. Cheng, 2010)

### 2.2.2.4 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

วัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตมีเทนควรมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ระหว่าง 16 : 1 ถึง 25 : 1 ตัวอย่างอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุอินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวเป็นเพียงสัดส่วนบ่งชี้เท่านั้น เนื่องจากไนโตรเจนบางส่วนอาจเป็นไนโตรเจนที่ยึดติดอยู่ในโครงสร้างของลิกนิน ซึ่งหากปริมาณลิกนินในชีวมวลที่นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นมีปริมาณสูงกว่าร้อยละ 7 จะทำให้มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นต่ำกว่าชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินต่ำกว่าร้อยละ 6.5 (Deublein & Steinhauser, 2011)

ในวัสดุตั้งต้นที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดแอมโมเนียปริมาณมาก และยับยั้งการเกิดมีเทน ในทางกลับกันหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงจะหมายถึงการขาดไนโตรเจน ส่งผลกระทบต่อการสร้างโปรตีนของเซลล์จุลินทรีย์ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้

ตารางที่ 2.5

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุอินทรีย์

วัสดุตั้งต้น	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N ratio)
มันฝรั่ง	44
พืชหมัก	35 – 70
หญ้าหมัก (หญ้าจากทุ่งหญ้า หรือไม้จำพวกถั่ว)	14 – 22
ฟาง (ฟางข้าว ฟางข้าวสาลี)	70
ธัญพืช	20 – 24
กากจากโรงเลื่อย	511
กระดาษ	173
มูลฝอยครัวเรือน	18
กากตะกอน	6
มูลสัตว์ (เปิด ไก่ แพะ หมู แกะ วัว)	8 – 24
สิ่งขับถ่ายจากมนุษย์	8
มูลช้าง	43
ปุ๋ยคอก (วัว หมู)	14 – 20
ผักตบชวา	25

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก *Biogas from Waste and Renewable Resources* (น. 128), โดย D.

Deublein and A. Steinhauser, 2011, Germany: Weinheim. ลิขสิทธิ์ 2011 โดย WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

### 2.2.2.5 สารอาหาร

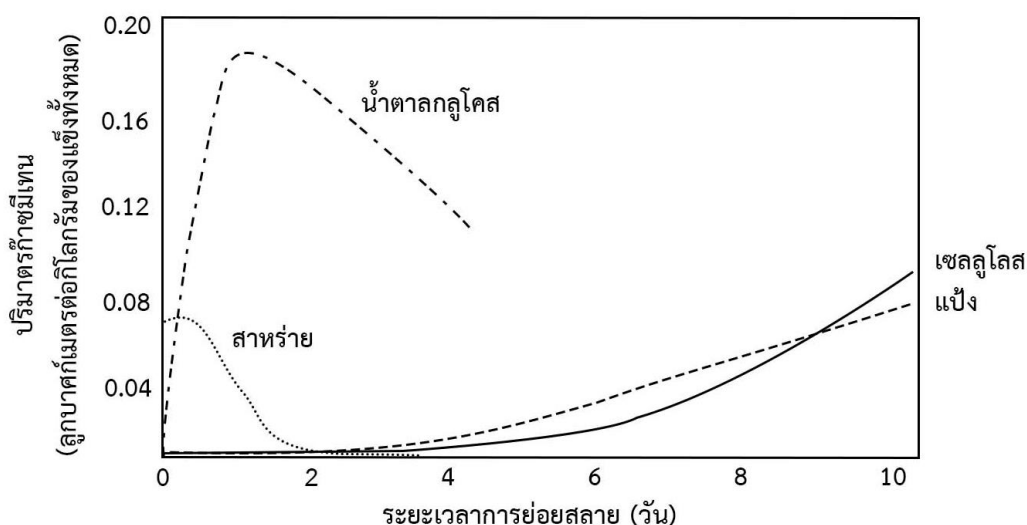
ความต้องการสารอาหารในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศมีปริมาณต่ำ เนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ที่อยู่ในกระบวนการย่อยสลายมีปริมาณน้อย อัตราส่วนของสารอาหารที่เพียงพอสำหรับกระบวนการผลิตมีเทนคือ คาร์บอน : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : ซัลเฟอร์ (C : N : P : S) เท่ากับ 500 – 1000 : 15 – 20 : 5 : 3 หรือ ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : ซัลเฟอร์ (COD : N : P : S) เท่ากับ 800 : 5 : 1 : 0.5 (Deublein & Steinhauser, 2011)

### 2.2.2.6 สารพิษและสารยับยั้ง

สารประกอบบางอย่างเป็นสารยับยั้งทำให้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศมีปัญหาหรือล้มเหลว สารประกอบนั้นอาจส่งผลยับยั้งโดยการไปหยุดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หรือทำให้จุลินทรีย์กลุ่มยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้น ขอบ่งชี้เมื่อเกิดการยับยั้งกระบวนการย่อยสลายคือก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงหรือก๊าซมีเทนไม่เกิดขึ้นในระบบ สารประกอบที่เป็นสารยับยั้งกระบวนการย่อยสลายที่มักพบ ได้แก่ แอมโมเนีย ซัลไฟด์ โลหะหนัก และสารประกอบอินทรีย์บางชนิด (J. J. Cheng, 2010)

### 2.2.3 วัสดุตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน

วัสดุตั้งต้นสำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำมาพิจารณาเทคโนโลยีที่ใช้และการดำเนินระบบ การย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ต่าง ๆ มีความยากง่ายในการย่อยสลายที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถเรียงลำดับการย่อยสลายจากง่ายไปจนถึงยากได้ดังนี้ น้ำตาล > โปรตีน > ไขมัน > เฮมิเซลลูโลส > เซลลูโลส > ลิกนิน (Deublein & Steinhauser, 2011) หากวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นขาดส่วนประกอบสำคัญที่จำเป็นสำหรับจุลินทรีย์ก็จะทำให้จุลินทรีย์นั้นหยุดกระบวนการเผาผลาญอาหาร ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนไม่เกิดขึ้น ดังนั้นการเติมสารที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์จึงเป็นสิ่งสำคัญ ตัวอย่างวัสดุตั้งต้นที่มีการย่อยสลายได้ง่าย เช่น น้ำตาล จะย่อยสลายได้รวดเร็วจึงใช้เวลาในการย่อยสลายสั้น แต่สำหรับวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น เซลลูโลส จะเกิดการย่อยสลายอย่างช้า ๆ และใช้เวลายาวนาน ดังภาพที่ 2.4 แต่แม้ว่าวัสดุที่ใช้จะย่อยสลายได้ยากแต่ก็จะเกิดการย่อยสลายในที่สุด (Deublein & Steinhauser, 2011)



ภาพที่ 2.4. อัตราการย่อยสลายเพื่อผลิตก๊าซมีเทนจากวัสดุตั้งต้นต่าง ๆ.

ปรับปรุงจาก *Biogas from waste and renewable resources* (น. 114), โดย D. Deublein and A. Steinhauser, 2011, Germany: Weinheim. ลิขสิทธิ์ 2011 โดย WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

### 2.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

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

โดยทั่วไปการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical methane potential, BMP) เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณผลผลิตก๊าซมีเทนที่เป็นไปได้ของวัสดุตั้งต้น นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงความสามารถและอัตราการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของวัสดุตั้งต้น อีกทั้งยังสามารถประเมินเบื้องต้นได้อย่างคร่าว ๆ ถึงการเกิดองค์ประกอบที่ยับยั้งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ (Drosg, Braun, Bochmann, & Al Saedi, 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 et al., 2012) จนกระทั่งพิจารณาแล้วว่าวัสดุตั้งต้นย่อยสลายอย่างสมบูรณ์หรือมีปริมาณก๊าซที่ผลิตขึ้นต่อวันน้อยกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด และควรมีการทำชุดควบคุม (Blank) โดยทำเช่นเดียวกับชุดทดลองแต่ไม่มีการเติมวัสดุตั้งต้น เพื่อหาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว (Drosg et al., 2013)

นอกจากนี้ชุดการทดลองของวัสดุตั้งต้นแต่ละชนิดควรมีการทำซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ ซึ่งพิจารณาจากความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ หากวัสดุตั้งต้นที่ใช้มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง (Heterogeneity) ควรมีการทำซ้ำมากกว่า 3 ซ้ำ เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สำหรับวัสดุตั้งต้นที่ยังไม่ทราบลักษณะการย่อยสลาย ต้องทำการเจือจางวัสดุตั้งต้นด้วยน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งควรเจือจางวัสดุตั้งต้นให้มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 5 จนถึงร้อยละ 100 (ไม่มีการเจือจาง) หลังจากนั้นจึงนำไปทำการทดลองเพื่อป้องกันการปนเปื้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไป (Overload) และก่อให้เกิดการยับยั้งจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ส่งผลให้การประเมินศักยภาพของวัสดุตั้งต้นผิดพลาด โดยประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุตั้งต้นต่ำกว่าความเป็นจริง (Underestimated) สำหรับความเข้มข้นของวัสดุตั้งต้นที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดที่มีค่าใกล้เคียงกันอย่างน้อย 2 ความเข้มข้นจากความเข้มข้นทั้งหมดที่ทำการเจือจาง แต่ถ้าค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเจือจางที่มากขึ้น (ความเข้มข้นของวัสดุหมักลดลง) ก็จำเป็นต้องทำการเจือจางเพิ่มโดยลดความเข้มข้นของวัสดุหมักนั้นลง (Angelidaki et al., 2009)

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

### 2.3.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนประกอบด้วยหลายปัจจัย และปัจจัยดังกล่าวอาจนำไปสู่ผลการศึกษาที่ไม่ถูกต้อง และไม่สามารถนำผลการศึกษาไปเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่น 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 (Bing Wang, 2016) สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ประกอบด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

### 2.3.1.1 สภาวะการทดลอง

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

สำหรับตัวอย่างรายละเอียดของสภาวะการทดลองที่ส่งผลต่อการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เช่น อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นสภาวะการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของจุลินทรีย์และวัสดุตั้งต้น หากอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นมีค่าสูงมักจะเกิดกระบวนการย่อยสลายอย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ แต่อาจให้ผลการศึกษาที่ไม่แน่นอน เช่น อาจมีปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากวัสดุตั้งต้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ ในทางตรงกันข้าม หากอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุตั้งต้นมีค่าต่ำจะทำให้ได้ผลการศึกษาที่ชัดเจน แต่อาจเกิดการยับยั้งในระหว่างกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเนื่องจากการสะสมของผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (Maya-Altamira, Baun, Angelidaki, & Schmidt, 2008)

### 2.3.1.2 วิธีการทดลองและความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น

โดยทั่วไปวิธีการทดลองที่นำมาใช้ในการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแต่ละวิธีก็มีข้อกำหนดต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน เช่น การบ่ม ปริมาตรของวัสดุผสมในขวดหมัก ปริมาตรของขวดหมัก การเก็บตัวอย่างก๊าซ การเก็บรวบรวมก๊าซ การกวนผสม และเทคนิคการวัดปริมาตรก๊าซ เป็นต้น

ตัวอย่างเช่นในการวัดปริมาตรก๊าซที่ผลิตขึ้นโดยใช้วิธีการวัดปริมาตรที่แตกต่างกัน 2 วิธี ได้แก่ การวัดจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไป (Manometric method)

และการวัดเชิงปริมาตร (Volumetric method) การวัดปริมาตรก๊าซโดยวัดจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปจำเป็นต้องใช้เครื่องมาโนมิเตอร์ และเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ รวมถึงต้องมีระบบป้องกันการรั่วไหลของก๊าซที่ดี เช่น บริเวณถังปฏิกรณ์ และข้อต่อต่าง ๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามอาจเกิดการประเมินปริมาตรของก๊าซที่ต่ำกว่าความเป็นจริง (Underestimation) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรั่วไหลของก๊าซและการละลายของก๊าซลงในของเหลวภายใต้สภาวะความดันเหนือความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ก๊าซที่ละลายลงในของเหลวดังกล่าวยังมีอิทธิพลต่อค่าพีเอชของระบบ และอาจส่งผลให้เกิดการยับยั้งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอีกด้วย (Rozzi & Remigi, 2004) นอกจากนี้การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟอาจเกิดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจากการเก็บตัวอย่างก๊าซด้วยมือ เนื่องจากปริมาตรของก๊าซที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟมีผลต่อการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซที่วิเคราะห์ได้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากแรงดันของก๊าซที่สร้างขึ้นจากการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาตรของก๊าซที่เก็บตัวอย่างด้วยมือมีปริมาตรที่ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงควรมีการระบายก๊าซภายในถังปฏิกรณ์และทำการวิเคราะห์อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลา และความละเอียดเป็นอย่างมาก รวมถึงต้องอาศัยทักษะการวิเคราะห์ส่วนบุคคลในการวิเคราะห์ ส่วนการวัดปริมาตรก๊าซโดยการวัดเชิงปริมาตรสามารถทำได้โดยใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำหรือการเก็บรวบรวมก๊าซในถุงเก็บก๊าซ ซึ่งปริมาตรของก๊าซคือปริมาตรของเหลวที่ได้จากการแทนที่หรือปริมาตรที่ได้จากการใช้กระบอกเก็บตัวอย่างก๊าซดูดก๊าซที่เก็บอยู่ภายในถุงเก็บก๊าซ (Liu, Olsson, & Mattiasson, 2004; B. Wang, Nges, Nistor, & Liu, 2014) อย่างไรก็ตามอาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นขณะวัดปริมาตรก๊าซโดยใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำ เช่น เกิดการดูดซับหรือแพร่กระจายขององค์ประกอบก๊าซบางส่วนในสารละลายที่ใช้ในการแทนที่ และเกิดการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงควรกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนทำการวัดปริมาตรของก๊าซที่ผลิตขึ้น (Walker, Zhang, Heaven, & Banks, 2009)

การวัดปริมาตรของก๊าซที่เกิดขึ้นโดยวิธีการวัดจากความดันของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปหรือโดยวิธีการวัดเชิงปริมาตร ทั้งสองวิธีมีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมนุษย์ที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้และส่งผลให้ผลการทดลองไม่เป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้นอกจากการศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนแล้ว การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน และเพื่อให้ทราบถึงลักษณะการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นจึงควรตรวจวัดการผลิตก๊าซแบบทราบผลทันที (Real time) แทนการวัดเป็นครั้งคราว ดังนั้นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสำหรับการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนควรเป็นระบบอัตโนมัติ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมนุษย์รวมถึงภาระงานต่าง ๆ ซึ่งระบบอัตโนมัติเป็นระบบที่สามารถบันทึกผลปริมาตรก๊าซ

ความดัน และอุณหภูมิแบบทันที ซึ่งนำไปใช้อธิบายลักษณะการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นได้อย่างครบถ้วนรวมถึงสามารถทำข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานได้ (Bing Wang, 2016)

### 2.3.1.3 การวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูล

ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจำเป็นต้องพิจารณาภาวะแวดล้อมของการทดลอง เช่น อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ เป็นต้น เนื่องจากก๊าซสามารถถูกบีบอัดได้ และปริมาตรของก๊าซยังขึ้นอยู่กับภาวะแวดล้อมดังกล่าว ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจึงควรนำมาคำนวณและนำเสนอในรูปแบบของสภาวะมาตรฐานเพื่อให้แน่ใจได้ว่าผลการทดลองถูกต้องและสามารถนำไปเปรียบเทียบได้ (Bing Wang, 2016)

โดยศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุตั้งต้นควรทำให้อยู่ในสภาวะปกติ (Normalization) และแสดงในรูปแบบของมิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหยหรือมิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมซีไอดีที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure, STP) คือ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้กฎของก๊าซอุดมคติ (Ideal gas law) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$V_{STP} = \frac{P_{gas}}{P_{STP}} \times \frac{T_{STP}}{T_{gas}} \times V_{gas}$$

สมการที่ 3

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)

### 2.3.2 จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายเพื่อผลิตก๊าซมีเทน

นอกจากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจะเป็นการวิเคราะห์หาผลผลิตก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุตั้งต้นแล้ว ยังเป็นการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง กับจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นอีกด้วย (Jensen, Ge, & Batstone, 2011) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้เป็นข้อมูลที่นำมาใช้ในการเลือกวัสดุตั้งต้นและกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทน หรือประเมินถึงอิทธิพลของวิธีการปรับสภาพวัสดุตั้งต้นวิธีต่าง ๆ

โดยจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายมีความไวต่ออิทธิพลของสภาวะการทดลองต่าง ๆ เช่น สภาวะที่ใช้ในการเก็บและบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาใช้ในการทดลอง ขนาดของวัสดุตั้งต้น ความเข้มข้นของวัสดุตั้งต้น และการกวนผสมระหว่างกระบวนการย่อยสลาย เป็นต้น (Samuel, Gujjala Lohit Kumar, & Rintu, 2017)

โดยทั่วไปการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ มาใช้เพื่อให้ทราบถึงจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสมการ Gompertz เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่ออธิบายถึงความเป็นไปของการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และการผลิตสารที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่ละลายได้ในกระบวนการหมักแบบแบตช์ และเนื่องจากกระบวนการผลิต ก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการที่มีความเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงได้มีการดัดแปลง สมการ Gompertz ดังกล่าวเพื่อใช้ทำนายการผลิตก๊าซมีเทน โดยสมการ Modified Gompertz นี้ เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินการผลิตก๊าซมีเทน จากพารามิเตอร์ทาง จลนพลศาสตร์ต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาพัก ( $\lambda$ ) ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ( $B_0$ ) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ( $\mu_m$ ) เป็นต้น (Lay, Li, & Noike, 1996; Samuel et al., 2017) โดยมีสมการแสดงดังสมการที่ 4

$$BMP_t = B_0 \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{\mu_m e}{B_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดย  $BMP_t$  = ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมจากการทำนาย (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย) ที่ระยะเวลาการย่อยสลาย  $t$

$B_0$  = ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดจากการทำนาย (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย)

$\mu_m$  = อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน)

$e$  =  $\exp(1)$

$\lambda$  = ระยะเวลาพัก (วัน)

$t$  = ระยะเวลาการย่อยสลาย (วัน)

## 2.4 วัสดุลิกโนเซลลูโลส

วัสดุลิกโนเซลลูโลส เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ปริมาณสูง โดยทั่วไปคือ ชีวมวล (Biomass) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่าง ๆ เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วัสดุเหลือทิ้งจากป่าไม้ วัสดุเหลือทิ้งจากการทำอุตสาหกรรม และพืชพลังงาน เป็นต้น

วัสดุเซลลูโลสประกอบด้วยพอลิเมอร์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) และประกอบด้วยองค์ประกอบอื่นอีกเล็กน้อย เช่น เพกทิน (Pectin) โปรตีน (Protein) สารแทรก (Extractives) และเถ้า (Ash) เป็นต้น (Bajpai, 2016) วัสดุเซลลูโลสแต่ละชนิดมีการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์เป็นโครงสร้างสามมิติที่มีความซับซ้อนแตกต่างกัน (Isikgor & Becer, 2015) และมีสัดส่วนของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้วัสดุเซลลูโลสชนิดเดียวกันก็อาจมีสัดส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดแตกต่างกัน เช่น สัดส่วนของพอลิเมอร์ต่าง ๆ ในพืชชนิดเดียวกันที่มีอายุ และระยะของการเจริญเติบโตที่ต่างกัน เป็นต้น (Mussatto & Teixeira, 2010) สำหรับตัวอย่างของวัสดุเซลลูโลส และสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในวัสดุเซลลูโลส แสดงดังตารางที่ 2.6

#### 2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของวัสดุเซลลูโลส

วัสดุเซลลูโลสเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนใหญ่ คือ ประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุเซลลูโลส และมีโครงสร้างยึดติดกันอย่างเหนียวแน่นกับลิกนินด้วยพันธะโคเวเลนต์ และพันธะไฮโดรเจน ทำให้วัสดุเซลลูโลสมีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทานต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และเอนไซม์ (Limayem & Ricke, 2012; Y. Zheng et al., 2014) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารแทรกอีกปริมาณเล็กน้อย โดยลักษณะโครงสร้างของสารแทรก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีรายละเอียดดังนี้

##### 2.4.1.1 สารแทรก

สารแทรกเป็นส่วนที่ไม่ใช่องค์ประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์พืช อาจมีสมบัติเป็นกรดหรือเป็นกลาง เช่น สารไอโซพรีน (Isoprene) เทอร์พีน (Terpene) เฮตเตอโรไซคลิก (Heterocyclic compounds) กรดเรซิน (Resins) สารพอลิฟีนอล (Polyphenol) และอัลคาลอยด์ (Alkaloid) เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นสารประกอบที่ทำให้พืชนั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกัน คือ ทำให้พืชแต่ละชนิดมีสี กลิ่น รส และความแข็งที่แตกต่างกัน ซึ่งสารแทรกเป็นสารที่ถูกสกัดได้โดยน้ำ และสารละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เอทานอล (Ethanol) อะซีโตน (Acetone) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) หรือสารผสมของเอทานอลกับเบนซีน เป็นต้น โดยทั่วไปสารแทรกประกอบด้วย ไขมัน (Lipids) สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) เทอร์พีนอยด์ (Terpenoids) กรดไขมัน (Fatty acids) กรดเรซิน (Resin acids) สเตอรอยด์ (Sterol) และไข (Waxes) เป็นต้น (Y. He et al., 2009)

การนำสารแทรกไปใช้ประโยชน์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของสารแทรกนั้น เช่น สารแทรกกลุ่มเทอร์พีน (Terpene) อาจใช้เป็นตัวทำละลาย น้ำหอม ยา สบู่ กาว และใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ส่วนกลุ่มพอลิฟีนอล (Polyphenol) อาจใช้ในการฟอกหนัง และสังเคราะห์กาว สำหรับกลุ่มอัลคาลอยด์ (Alkaloid) ส่วนใหญ่มีประโยชน์ทางด้านเภสัชกรรม เป็นต้น

## ตารางที่ 2.6

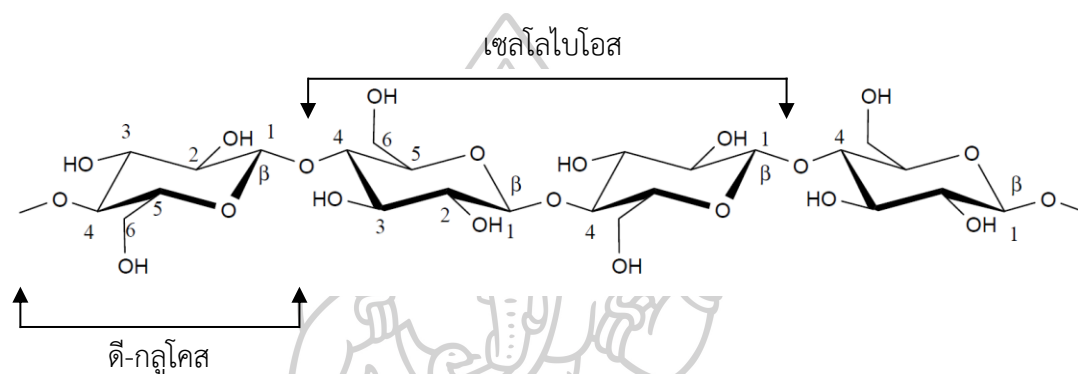
สัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ

วัสดุลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)	ลิกนิน (ร้อยละ)
วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร			
ซังข้าวโพด	33.7 – 41.2	31.9 – 36.0	6.1 – 15.9
ชานอ้อย	25 – 45	28 – 32	15 – 25
ฟางข้าว	29.2 – 34.7	23.0 – 25.9	17.0 – 19.0
ฟางข้าวสาลี	35 – 39	23 – 30	12 – 16
ฟางข้าวบาร์เลย์	33 – 40	20 – 35	8 – 17
เส้นใยจากลำต้นและใบข้าวโพด	39 – 42	22 – 28	18 – 22
เปลือกถั่ว	25 – 30	25 – 30	30 – 40
วัสดุเหลือทิ้งจากป่าไม้			
ลำต้นไม้เนื้อแข็ง	40 – 55	24 – 40	18 – 25
ลำต้นไม้เนื้ออ่อน	45 – 50	25 – 30	25 – 35
ใบไม้	15 – 20	80 – 85	0
วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม			
เศษกระดาษจากการผลิตเยื่อ	60 – 70	10 – 20	5 – 10
กระดาษหนังสือพิมพ์	40 – 55	25 – 40	18 – 30
กระดาษ	85 – 99	0	0 – 15
พืชพลังงาน			
ดอกทานตะวัน	5.18	34.06	7.72
หญ้าสวิตช์	35 – 40	25 – 30	15 – 20

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “Lignocellulosic biomass: A sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers,” โดย F. H. Isikgor, and C. R. Becer, 2015, *Polymer Chemistry*, 25, น. 4500. ลิขสิทธิ์ 2015 โดย The Royal Society of Chemistry. “Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose: structure and chemical process,” โดย H. V. Lee, S. B. Hamid, and S. K. Zain, 2014, *The Scientific World Journal*, 2014, น. 2. ลิขสิทธิ์ 2014 โดย H. V. Lee et al. “Effect of lignin content of lignocellulosic material on hydrolysis efficiency,” โดย M. Raud, M. Tutt, J. Olt, and T. Kikas, 2015, *Agronomy Research*, 2, น. 408.

### 2.4.1.2 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่พบปริมาณมากที่สุดในวัสดุชีวเซลลูโลส ซึ่งโดยทั่วไปพบประมาณร้อยละ 30 – 50 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุชีวเซลลูโลส (Limayem & Ricke, 2012) โครงสร้างของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์สายตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือน้ำตาลดี-กลูโคส (D-Glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1,4-ไกลโคไซด์ ( $\beta$ -1,4-glycosidic bonds) ในลักษณะที่โมเลกุลของกลูโคสแต่ละโมเลกุลเชื่อมต่อกันแบบกลับด้านกัน คือ เชื่อมต่อกันโดยทำมุม 180 องศา ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5. โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.

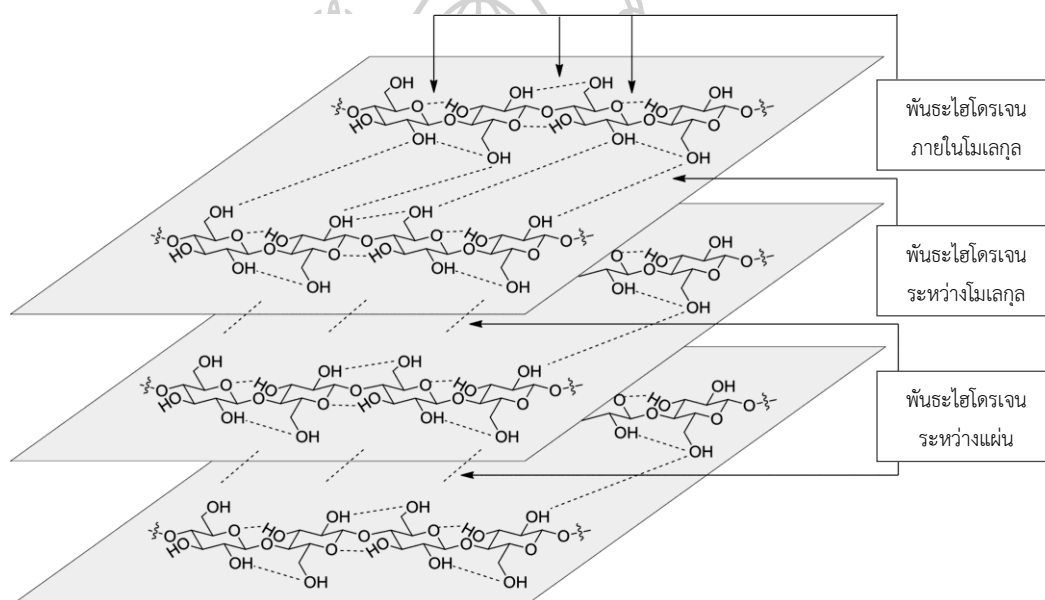
ปรับปรุงจาก *Structures of Hemicelluloses and Pectins in Wood and Pulp* (น. 15), โดย C. Laine, 2005, Finland: Helsinki University of Technology. ลิขสิทธิ์ 2005 โดย Oy Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium Ab.

รูปฟอร์มทางเคมีโดยทั่วไปของเซลลูโลสคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  โดยที่ n หมายถึงจำนวนหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสที่มาประกอบกันเป็นหนึ่งพอลิเมอร์ (H. Chen, 2014) โดยโครงสร้างของเซลลูโลสส่วนใหญ่มีจำนวนหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสอยู่ระหว่าง 5000 – 10000 หน่วย อย่างไรก็ตามสามารถมีจำนวนหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสได้มากถึง 15000 หน่วย (Ek, Gellerstedt, & Henriksson, 2009) กล่าวอีกทางหนึ่งคือ โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือน้ำตาลเซลโลไบโอส (Cellobiose) ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เกิดจากกลูโคส 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1,4-ไกลโคไซด์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเซลลูโลสมีจำนวนหน่วยย่อยของน้ำตาลเซลโลไบโอสอยู่ระหว่าง 2500 – 5000 หน่วย (Ek et al., 2009; Luiz Pereira Ramos, 2003)

การเชื่อมต่อกันของกลูโคสด้วยพันธะเบต้า-1,4-ไกลโคไซด์ ( $\beta$ -1,4-glycosidic bond) ทำให้พอลิเมอร์ของเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะสายโซ่ตรง นอกจากนี้



การจัดเรียงตัวของโมเลกุลยังมีไฮดรอกไซด์กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอทั้งสองด้านของมอนอเมอร์ ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ซึ่งประกอบด้วย พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเซลลูโลส (Intra-molecular hydrogen bonding) พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส (Inter-molecular hydrogen bonding) และพันธะไฮโดรเจนระหว่างแผ่นของเซลลูโลส (Inter-sheet hydrogen bonding) พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นผลให้เกิดโครงสร้างของเซลลูโลสหลายสายขนานติดกัน ดังภาพที่ 2.6 การเชื่อมต่อกันของโมเลกุลเซลลูโลสนี้ ก่อให้เกิดโครงสร้างไมโครไฟบริล (Microfibrills) ไฟบริล (Fibrils) และรวมกันเป็นเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibers) (Bhaumik & Dhepe, 2015; Harmsen, Huijgen, Bermúdez López, & Bakker, 2010; Laine, 2005) โดยโครงสร้างเซลลูโลสของเซลล์พืชแสดงดังภาพที่ 2.7

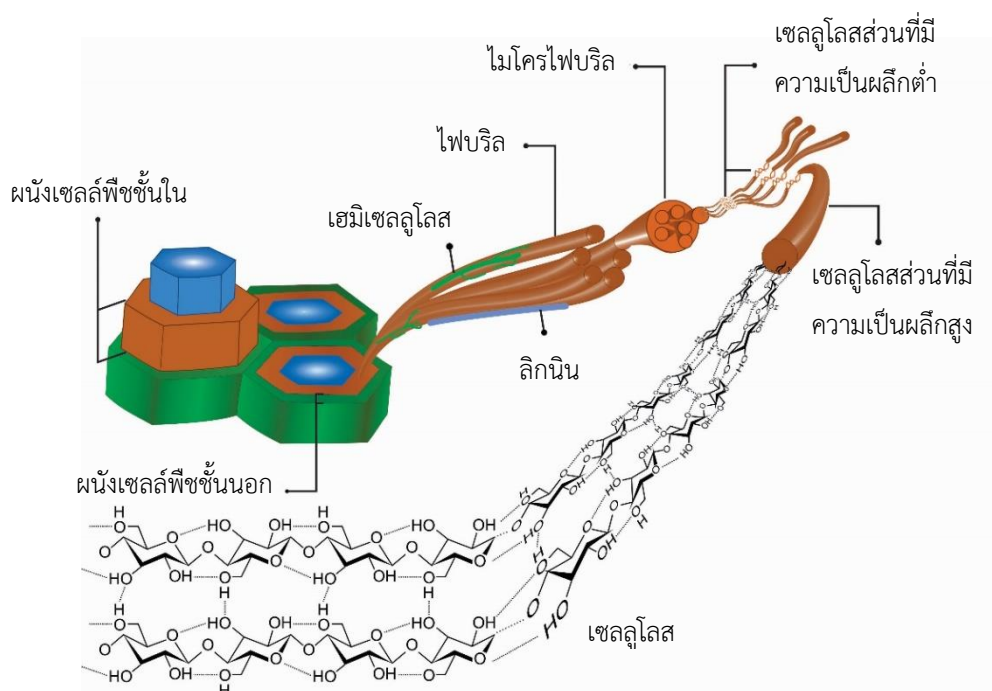


ภาพที่ 2.6. พันธะไฮโดรเจนของโครงสร้างเซลลูโลส.

ปรับปรุงจาก Conversion of biomass into sugars, In D. Murzin and O. Simakova (Eds.), *Biomass sugars for non-fuel applications* (น. 7), โดย P. Bhaumik and P. L. Dhepe, 2015, Royal Society of Chemistry. ลิขสิทธิ์ 2016 โดย Royal Society of Chemistry.

โครงสร้างของเซลลูโลสในวัสดุลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่มีความเป็นผลึกสูง (Crystalline regions) และส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำ (Amorphous regions) (Harmsen et al., 2010) โดยส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงคือโครงสร้างเซลลูโลสที่มีพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรง โครงสร้างเซลลูโลสส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงจึงเป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำ และย่อยสลายได้ยาก สำหรับส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำคือโครงสร้าง

เซลลูโลสที่มีพันธะไฮโดรเจนจับกันอยู่อย่างหลวม ๆ และมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ทำให้ส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำย่อยสลายได้ง่ายกว่าส่วนที่มีความเป็นผลึกสูง (Bajpai, 2016; Visakh & Thomas, 2010) ซึ่งวัสดุลิกโนเซลลูโลสส่วนใหญ่มีโครงสร้างเซลลูโลสที่ประกอบด้วยโครงสร้างส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงประมาณ 2 ใน 3 ของโครงสร้างเซลลูโลสทั้งหมด และประกอบด้วยโครงสร้างส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำประมาณ 1 ใน 3 ของโครงสร้างเซลลูโลสทั้งหมด (Mussatto & Teixeira, 2010)



ภาพที่ 2.7. โครงสร้างเซลลูโลสในเซลล์พืช.

ปรับปรุงจาก Chemical composition and structure of natural lignocellulose, In H. Chen (Ed.), *Biotechnology of lignocellulose: Theory and practice* (น. 33), โดย H. Chen, 2014, Dordrecht: Springer Netherlands. ลิขสิทธิ์ 2014 โดย Chemical Industry Press, Beijing and Springer Science+Business Media Dordrecht.

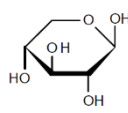
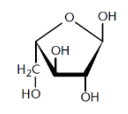
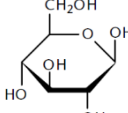
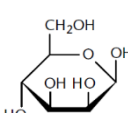
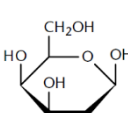
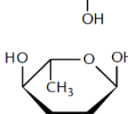
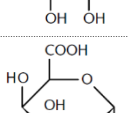
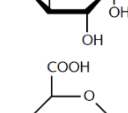
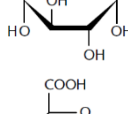
#### 2.4.1.3 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่พบในวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นปริมาณมากรองจากเซลลูโลส โดยทั่วไปพบประมาณร้อยละ 15 – 35 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Limayem & Ricke, 2012) เฮมิเซลลูโลสมีลักษณะโครงสร้างเป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์แบบมีกิ่งก้านสาขา ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ประมาณ 200 หน่วย ได้แก่ น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม (Pentoses) หรือ น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม (Hexoses) และอาจประกอบด้วยกรดยูโรนิกชนิดต่าง ๆ (Uronic acids) (J. J. Cheng, 2010; Kvitlborn, 2014)

รายละเอียดและโครงสร้างของหน่วยย่อยต่าง ๆ ที่มักพบในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสแสดงดังตารางที่ 2.7

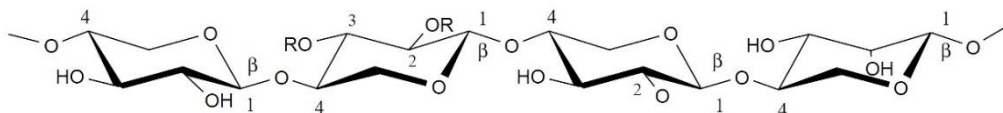
ตารางที่ 2.7

หน่วยย่อยและโครงสร้างของหน่วยย่อยที่มักพบในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

กลุ่มของหน่วยย่อย	หน่วยย่อย	โครงสร้าง
น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม	ไซโลส (Xylose)	
	อะราบินโนส (Arabinose)	
น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม	กลูโคส (Glucose)	
	แมนโนส (Mannose)	
	กาแล็กโทส (Galactose)	
	แรมนโนส (Rhamnose)	
กรดยูโรนิก	กรดกาแล็กทูโรนิก (Galacturonic acid)	
	กรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid)	
	กรดเมทิลกลูคูโรนิก (Methylglucuronic acid)	

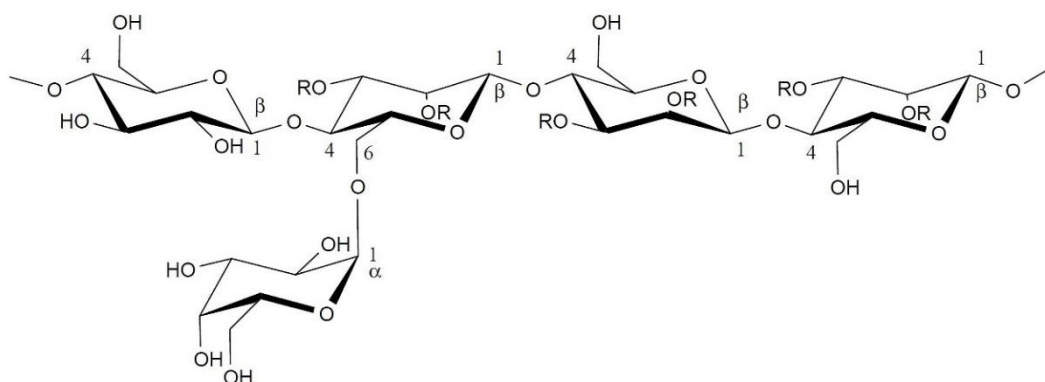
หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก Anaerobic digestion for biogas production. In J. J. Cheng (Ed.), *Biomass to Renewable Energy Process* (น. 26-29), โดย J. J. Cheng, 2010, United States of America: CRC Press. ลิขสิทธิ์ 2010 โดย Taylor and Francis Group. "Plant cell walls," โดย S. C. Fry, 2001, *Encyclopedia of Life Sciences*, น. 3-6. ลิขสิทธิ์ 2001 โดย Nature Publishing Group. *Enzymatic Pretreatment of Lignocellulose Rich Waste for Improved Biogas Production* (น. 9), โดย C. Kvillborn, 2014, Sweden: Linköping University. ลิขสิทธิ์ 2014 โดย Carin Kvillborn.

โครงสร้างสายหลักของเฮมิเซลลูโลสเป็นได้ทั้งโครงสร้างโฮโมพอลิเมอร์ (ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียวกัน) หรือเฮเทอโรพอลิเมอร์ (ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด) ซึ่งจากชนิดของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มาประกอบกันเป็นโครงสร้างสายหลักนี้ทำให้สามารถจำแนกเฮมิเซลลูโลสออกได้เป็นหลายประเภท เช่น ไซแลน (Xylans) แมนแนน (Mannans) กลูแคน (Glucans) กลูคูโรโนไซแลน (Glucuronoxylans) อะราบิโนไซแลน (Arabinoxylans) กลูโคแมนแนน (Glucomannans) กาแล็กโทแมนแนน (Galactomannans) กาแล็กโทกลูโคแมนแนน (Galactoglucomannans) และไซโลกลูแคน (Xyloglucans) เป็นต้น (Mussatto & Teixeira, 2010) สำหรับโครงสร้างส่วนใหญ่ของเฮมิเซลลูโลสที่พบในไม้เนื้อแข็งและหญ้า ได้แก่ ไซแลน (Xylans) ส่วนในไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ กาแล็กโทกลูโคแมนแนน (Galactoglucomannans) (J. J. Cheng, 2010; Laine, 2005) ดังภาพที่ 2.8 และภาพที่ 2.9 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.8. โครงสร้างไซแลนในไม้เนื้อแข็งและหญ้า.

ปรับปรุงจาก *Structures of Hemicelluloses and Pectins in Wood and Pulp* (น. 16), โดย C. Laine, 2005, Finland: Helsinki University of Technology. ลิขสิทธิ์ 2005 โดย Oy Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium Ab.



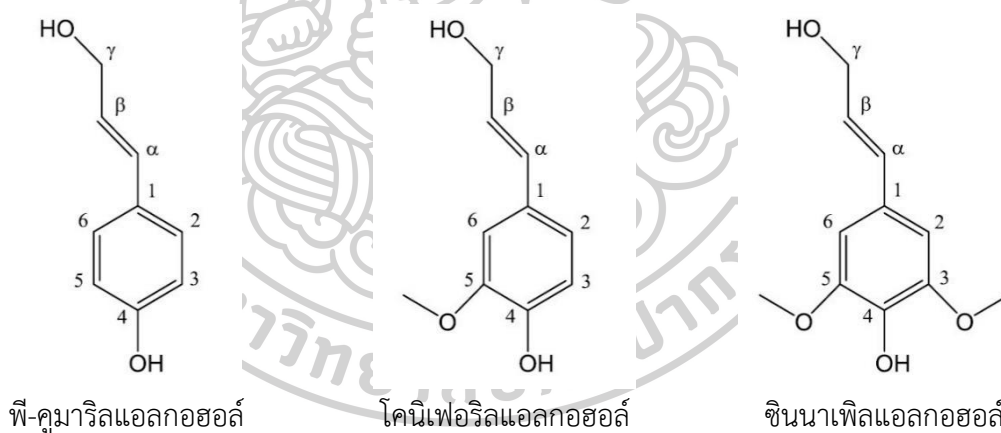
ภาพที่ 2.9. โครงสร้างกาแล็กโทกลูโคแมนแนนในไม้เนื้ออ่อน.

ปรับปรุงจาก *Structures of Hemicelluloses and Pectins in Wood and Pulp* (น. 16), โดย C. Laine, 2005, Finland: Helsinki University of Technology. ลิขสิทธิ์ 2005 โดย Oy Keskuslaboratorio-Centrallaboratorium Ab.

เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างของสายพอลิเมอร์ที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสกับโครงสร้างของเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีกิ่งก้านสาขา และเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกต่ำ ส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสสามารถไฮโดรไลซิสได้ง่ายกว่าเซลลูโลส (Mussatto & Teixeira, 2010)

#### 2.4.1.4 ลิกนิน

ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่พบในวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นปริมาณรองจากเฮมิเซลลูโลส โดยทั่วไปพบประมาณร้อยละ 10 – 25 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Limayem & Ricke, 2012) ลิกนินมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความซับซ้อนมาก ประกอบด้วยหน่วยของฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างแบบสามมิติที่มีความเป็นผลึกต่ำ (Amorphous structure) (Harmsen et al., 2010; Isikgor & Becer, 2015; Mussatto & Teixeira, 2010) สำหรับหน่วยของฟีนิลโพรเพนที่มักพบเป็นองค์ประกอบของลิกนินมากที่สุด ได้แก่ พี-คูมาริลแอลกอฮอล์ (P-coumaryl alcohol) โคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ (Coniferyl alcohol) และ ซินนาเพิลแอลกอฮอล์ (Sinapyl alcohol) โครงสร้างเหล่านี้มีหมู่เมทอกซี (Methoxy group) ต่ออยู่กับวงแหวนเป็นจำนวนที่แตกต่างกัน (Ek et al., 2009) (ภาพที่ 2.10)



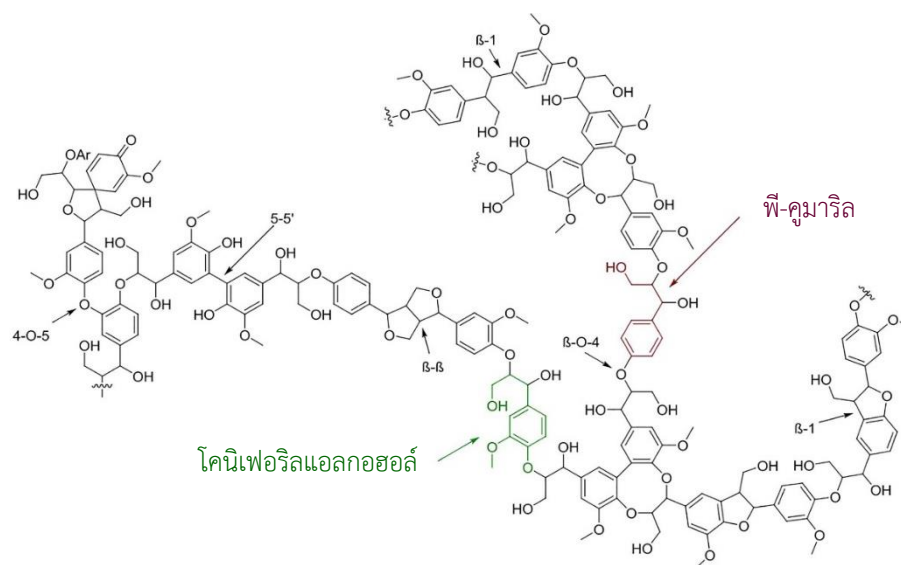
ภาพที่ 2.10. หน่วยย่อยโครงสร้างหลักของลิกนิน.

ปรับปรุงจาก *Selective cleavage of C-O bonds and hydrodeoxygenation of lignin fragment molecules* (น. 9), โดย J. He, 2014, Germany: Technische Universität München.

เมื่อพิจารณาจากจำนวนหน่วยย่อยของฟีนิลโพรเพนสามารถจำแนกลิกนินออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก (Ek et al., 2009) ได้แก่

### 1) ลิกนินในไม้เนื้ออ่อน

ลิกนินในไม้เนื้ออ่อน (Softwood lignin) หรือกัวเอซิลลิกนิน (Guaiacyl lignin) เกือบทั้งหมดประกอบด้วยโคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ และอาจมีพี-คูมาริลแอลกอฮอล์อีกจำนวนเล็กน้อย แต่ไม่มีซินนาเพิลแอลกอฮอล์หรือมีน้อยมาก (ภาพที่ 2.11) ลิกนินชนิดนี้พบอยู่ในไม้เนื้ออ่อนจำพวกสน แปะก๊วย และปรง รวมถึงในไม้เนื้อแข็งเขตร้อนบางชนิด (พีชใบเลี้ยงคู่) ก็มีลิกนินชนิดนี้เป็นองค์ประกอบอยู่เช่นกัน



ภาพที่ 2.11. โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน.

ปรับปรุงจาก *Selective cleavage of C-O bonds and hydrodeoxygenation of lignin fragment molecules* (น. 10), โดย J. He, 2014, Germany: Technische Universität München.

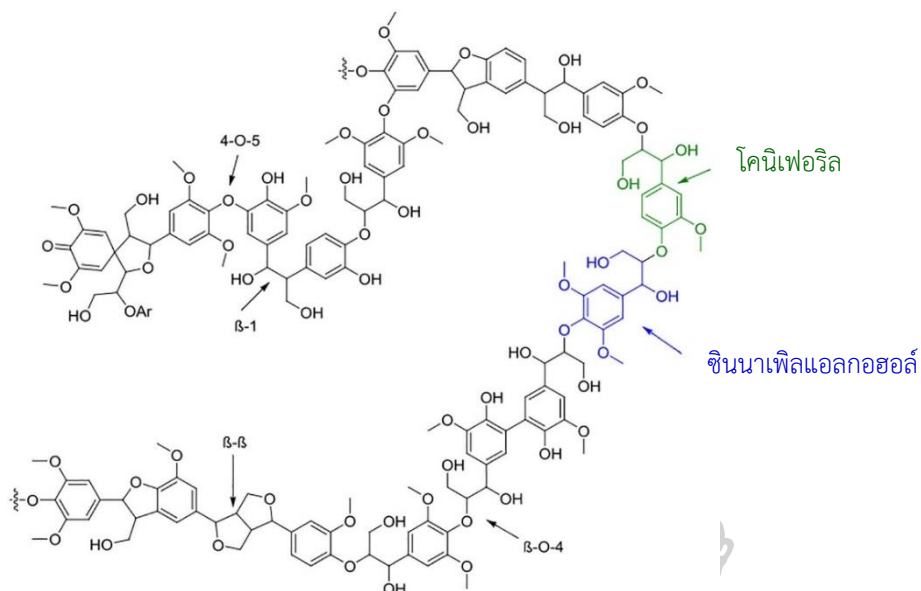
### 2) ลิกนินในไม้เนื้อแข็ง

ลิกนินในไม้เนื้อแข็ง (Hardwood lignin) หรือไซลิจิล-กัวเอซิลลิกนิน (Syringyl-guaiacyl lignin) ประกอบด้วยโคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ และซินนาเพิลแอลกอฮอล์ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน หรืออาจมีปริมาณซินนาเพิลแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้นได้ถึงสามเท่าของปริมาณโคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ (ภาพที่ 2.12) ลิกนินในไม้เนื้อแข็งบางชนิดอาจมีพี-คูมาริลแอลกอฮอล์อีกจำนวนเล็กน้อย ลิกนินชนิดนี้พบอยู่ในพีชใบเลี้ยงคู่ชนิดให้ดอก เช่น ต้นไม้ที่มีใบกว้าง เป็นต้น

### 3) ลิกนินในหญ้า

ลิกนินในหญ้า (Grass lignin) หรือเฮซจีเอสลิกนิน (Hydroxy phenol, Guaiacyl, Syringyl, HGS lignin) ประกอบด้วยหน่วยย่อยของฟีนิลโพรเพนทั้ง 3 ชนิด และมีปริมาณ

ของพี-คูมาริลแอลกอฮอล์สูงกว่าลิกนินชนิดอื่น ๆ ลิกนินชนิดนี้พบอยู่ในหญ้า และในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชนิดอื่น ๆ ด้วย เช่น ปาล์ม และกล้วย เป็นต้น



ภาพที่ 2.12. โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้อแข็ง.

ปรับปรุงจาก *Selective cleavage of C-O bonds and hydrodeoxygenation of lignin fragment molecules* (น. 9), โดย J. He, 2014, Germany: Technische Universität München.

ในวัสดุลิกโนเซลลูโลส ลิกนินเป็นโครงสร้างที่เชื่อมต่อกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอย่างแน่นหนา ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรง ทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางเอนไซม์และทางเคมี ลิกนินจึงเป็นเสมือนตัวป้องกันทางกายภาพ-เคมีต่อการเข้าทำลายโดยจุลินทรีย์ให้กับเซลล์พืช (Mussatto & Teixeira, 2010)

#### 2.4.2 สมบัติของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

สารตั้งต้นของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อให้เกิดก๊าซมีเทน ได้มาจากการสลายตัวของแป้ง เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014) แต่วัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อน และมีความเป็นผลึกสูง (Blom et al., 2012) รวมถึงประกอบด้วยลิกนินซึ่งเป็นส่วนป้องกันการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้

กระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเกิดได้ยากขึ้น และเกิดก๊าซชีวภาพต่ำ (L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014; Teghammar, 2013)

สำหรับสมบัติด้านต่าง ๆ ที่สำคัญของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่ส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ความเป็นผลึกของเซลลูโลส การเข้าถึงโครงสร้างเซลลูโลสที่ถูกปกคลุมด้วยลิกนินและเฮมิเซลลูโลส จำนวนหน่วยย่อยของกลูโคสที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างเซลลูโลส และจำนวนหมู่เอซิทิลในโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส (Wyman, 1996) โดยมีรายละเอียดของสมบัติแต่ละด้านดังนี้

#### 2.4.2.1 ระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลส

ไมโครไฟบริลในโครงสร้างเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงและส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำ ซึ่งระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลสจะขึ้นอยู่กับปริมาณผลึกของแต่ละส่วนดังกล่าว โดยทั่วไปเซลลูโลสมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงประมาณ 2 ใน 3 ของโครงสร้างเซลลูโลสทั้งหมด (Chum, Douglas, Feinberg, & Schroeder, 1985) และมีการศึกษาพบว่าเอนไซม์เซลลูเลสสามารถไฮโดรไลซ์ส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำของเซลลูโลสได้ดี แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซ์ส่วนที่มีความเป็นผลึกสูงของเซลลูโลส ด้วยเหตุนี้เซลลูโลสที่มีระดับความเป็นผลึกสูงจึงมีความทนทานต่อการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์มากขึ้น และเมื่อระดับความเป็นผลึกของลิกโนเซลลูโลสลดลง ความสามารถในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสจึงเพิ่มสูงขึ้น (Fan, Lee, & Beardmore, 1980)

อย่างไรก็ตาม มีบางการศึกษาที่พบว่า เมื่อระดับความเป็นผลึกของลิกโนเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน (Grethlein, 1985; Wyman, 1996) ซึ่งเป็นผลการศึกษาที่มีลักษณะตรงกันข้ามกับผลการศึกษาก่อน ๆ ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากการที่ไม่ได้มีการพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เมื่อพิจารณาการศึกษาของ Grethlein (1985) ที่ได้ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเจือจางและวิเคราะห์การกระจายขนาดของรูพรุนร่วมด้วย ผลการศึกษาพบว่า อัตราการไฮโดรไลซิสวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ทำการศึกษาในระยะเริ่มต้นมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับปริมาตรของรูพรุนที่เอนไซม์เซลลูเลสสามารถเข้าถึงได้ แต่ระดับความเป็นผลึกไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราการไฮโดรไลซิส ส่วน Kim and Holtzapple (2006) พบว่าระดับความเป็นผลึกของฟางข้าวโพดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 43 เป็น ร้อยละ 60 จากการกำจัดลิกนินด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการกำจัดส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำ (ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส) แต่ระดับความเป็นผลึกที่เพิ่มสูงขึ้นในวัสดุที่ได้รับการปรับสภาพเบื้องต้นดังกล่าวก็ไม่ได้ส่งผลในเชิงลบต่อผลผลิตของกระบวนการไฮโดรไลซิสแต่อย่างใด นอกจากนี้ Fan et al. (1980) ได้ทำการศึกษาผลของการบดต่อพื้นที่ผิวและระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลส โดยพบว่า ระดับความ



เป็นผลึกของเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเซลลูโลสมีขนาดเล็กลงโดยการบด ทั้งนี้คณะผู้ศึกษาเชื่อว่าการตกผลึกซ้ำเกิดขึ้นในขณะที่เซลลูโลสเกิดการพองตัวจากน้ำระหว่างการบดด้วยเครื่องโม่บด (Ball mill) จึงทำให้ระดับความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นในเซลลูโลสที่ถูกบดอย่างละเอียด

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลสเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุลิกโนเซลลูโลส อย่างไรก็ตามไม่ได้มีเพียงปัจจัยนี้เท่านั้นที่ส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ เนื่องจากธรรมชาติของเซลลูโลสมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้วัสดุลิกโนเซลลูโลสยังประกอบด้วยองค์ประกอบอื่น ๆ อีก เช่น ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น

#### 2.4.2.2 ผลของพื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้

ในหลายการศึกษา พบว่า ปริมาตรและจำนวนของรูพรุน (พื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้) มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับความสามารถในการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ ทั้งนี้กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นเป็นผลมาจากการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสซึ่งสัมพันธ์กันกับพื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้นั้นเอง โดยพื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้มีความสัมพันธ์กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งต่อไปนี้ ได้แก่ ระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลส การถูกปกคลุมด้วยลิกนิน หรือการมีอยู่ของเฮมิเซลลูโลส หรืออาจมีความสัมพันธ์กับทุกปัจจัยดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จากปัจจัยเกี่ยวกับพื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้เพียงแค่ปัจจัยเดียว (Wyman, 1996) ซึ่งกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ในขั้นต้นประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ (1) การยึดเกาะ (Adsorption) ของเอนไซม์เซลลูเลสที่อยู่ในวัฏภาคของเหลวบนพื้นผิวของเซลลูโลสที่เป็นวัฏภาคของแข็ง (2) การย่อยสลายเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลอย่างง่าย ซึ่งส่วนใหญ่กลายเป็นเซลโลไบโอส และโอลิโกเมอร์ และ (3) การหลุดออก (Desorption) ของเอนไซม์เซลลูเลสกลับไปอยู่ในวัฏภาคของเหลว ดังนั้นกระบวนการไฮโดรไลซิสจึงมีลักษณะปฏิกิริยาเป็นแบบการเร่งปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งมีวัฏภาคต่างกันหรือเรียกว่าการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalytic reaction) ด้วยเหตุที่กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ต้องมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างโมเลกุลของเอนไซม์เซลลูเลสและเซลลูโลส จึงทำให้พื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้ในวัสดุลิกโนเซลลูโลสและการทำปฏิกิริยากันกับเอนไซม์เป็นปัจจัยจำกัดของกระบวนการ (Fan et al., 1980; Stone, Scallan, Donefer, & Ahlgren, 1969; Sun & Cheng, 2002)

พื้นที่ผิวของวัสดุลิกโนเซลลูโลสสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ พื้นที่ผิวภายนอก และพื้นที่ผิวภายใน โดยพื้นที่ผิวภายนอกมีความสัมพันธ์กับขนาดและรูปร่างของอนุภาค ส่วนพื้นที่ผิวภายในจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของไมโครไฟบริลในเส้นใยเซลลูโลส โดยทั่วไปเส้นใยเซลลูโลสแห้งมักมีขนาดเล็กโดยมีขนาดประมาณ 15 – 40 ไมโครเมตร จึงทำให้มีพื้นที่ผิว

จำเพาะภายนอกที่ค่อนข้างสูงคือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 – 1.6 ตารางเมตรต่อกรัม แต่เส้นใยเซลลูโลสแห้งกลับมีพื้นที่ผิวภายในน้อยกว่าพื้นที่ผิวภายนอก ทั้งนี้เพราะเมื่อเส้นใยแห้ง เส้นใยจะเกิดการยุบตัวและหดตัวแบบไม่สามารถผันกลับได้ จึงทำให้พื้นที่ผิวที่สามารถเข้าถึงได้ลดลง ส่วนวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่เกิดการพองตัวด้วยน้ำหรือตัวทำละลายมีขั้วจะมีพื้นที่ผิวภายในที่สูงมาก (Fan et al., 1980) เนื่องจากน้ำมีผลอย่างมากต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของเซลลูโลส โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นได้เมื่อเปียกน้ำ นอกจากนี้ น้ำยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลส เพราะน้ำทำให้เกิดการตกผลึกซ้ำของเซลลูโลสส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำ

พื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ ตามปกติอัตราการใช้ไฮโดรไลซิสมักมีค่าสูงมากในระยะแรกและมีค่าลดลงในระยะหลัง เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะหรือพื้นที่ผิวของเซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้ต่อกรัมของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (ตารางเมตรต่อกรัม) มีมากในระยะแรก อย่างไรก็ตามมีการรายงานว่าพื้นที่ผิวของเซลลูโลสไม่ใช่ปัจจัยหลักที่จำกัดการเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสบริสุทธิ์ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อัตราการใช้ไฮโดรไลซิสที่มีค่าลดลงในระยะหลังไม่ได้เป็นผลมาจากการไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ผิวของเซลลูโลส แต่เป็นผลมาจากความยากลำบากของการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในส่วนที่มีความเป็นผลึกสูง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคาดการณ์ได้ถึงอัตราการใช้ไฮโดรไลซิสที่ลดต่ำลงหลังจากเกิดการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสในส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำ (Fan et al., 1980)

#### 2.4.2.3 ผลของลิกนิน

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกเชื่อมยึดติดกันด้วยลิกนิน โดยลิกนินทำหน้าที่ให้ความสมบูรณ์และความแข็งแรงแก่โครงสร้าง และป้องกันการขยายตัวของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่ทราบกันดีว่าปริมาณและการกระจายของลิกนินเป็นปัจจัยสำคัญที่แสดงถึงความคงทนของวัสดุลิกโนเซลลูโลสต่อกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์โดยไปจำกัดความสามารถในการเข้าถึงของเอนไซม์ ดังนั้นการกำจัดลิกนินจึงสามารถเพิ่มอัตราการใช้ไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ให้สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามวิธีการส่วนใหญ่ที่ใช้ในการกำจัดลิกนินได้ทำให้เกิดการไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสขึ้นด้วย ดังนั้นกระบวนการกำจัดลิกนินจึงไม่ได้เฉพาะเจาะจงกับการกำจัดลิกนินแต่เพียงอย่างเดียว (Wyman, 1996)

สำหรับลิกนินที่ละลายได้ (Dissolved lignin) ซึ่งเกิดขึ้นจากการปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุลิกโนเซลลูโลสจะกลายเป็นสารยับยั้งเอนไซม์ต่าง ๆ เช่น เซลลูเลส (Cellulase) ไซแลนเนส (Xylanase) และกลูโคซิเดส เป็นต้น โดยเอนไซม์เซลลูเลสชนิดต่าง ๆ ได้รับความกระทบจากการยับยั้งการทำงานโดยลิกนินที่ละลายได้แตกต่างกันออกไป ส่วนเอนไซม์ไซแลนเนสและกลูโคซิเดสชนิดต่าง ๆ ได้รับความกระทบน้อยกว่าเอนไซม์เซลลูเลส (Berlin et al., 2006)

องค์ประกอบและการกระจายของลิกนินมีความสำคัญเช่นเดียวกันกับระดับความเข้มข้นของลิกนิน ทั้งนี้พบว่าไม้เนื้ออ่อนบางชนิดมีความทนทานมากกว่าไม้เนื้อแข็ง ซึ่งเป็นไปได้ว่าลักษณะดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับชนิดของลิกนิน เนื่องจากไม้เนื้ออ่อนมักประกอบด้วย กัวเอซิลลิกนิน (Guaiacyl lignin) เป็นส่วนใหญ่ ขณะที่ไม้เนื้อแข็งประกอบด้วยส่วนผสมระหว่าง กัวเอซิลลิกนิน และไซลีนจิลลิกนิน (Syringyl lignin) และมีการรายงานว่ากัวเอซิลลิกนินทำหน้าที่ในการขัดขวางการพองตัวของเส้นใยและการเข้าถึงของเอนไซม์ได้ดีกว่าไซลีนจิลลิกนิน (L.P. Ramos, Breuil, & Saddler, 1992)

ในบางการศึกษา เช่น Mooney, Mansfield, Touhy, and Saddler (1998) มักเชื่อมโยงบทบาทการยับยั้งของลิกนินว่าเป็นตัวขัดขวางการพองตัวของเซลลูโลส แต่ในอีกด้านหนึ่งการพองตัวของเซลลูโลสสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีการกำจัดลิกนิน และการพองตัวของเซลลูโลสไม่ได้ทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือช่วยส่งเสริมให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามมีผลการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าลิกนินยังคงส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ แม้แต่ในกรณีที่ลิกนินไม่ได้เป็นตัวป้องกันการพองตัวของเซลลูโลส ทั้งนี้การกำจัดลิกนินได้ส่งผลให้อัตราการไฮโดรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่สามารถเข้าถึงได้ด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นจากการที่มีจำนวนรูพรุนมากขึ้นหลังจากลิกนินถูกกำจัดออกไป

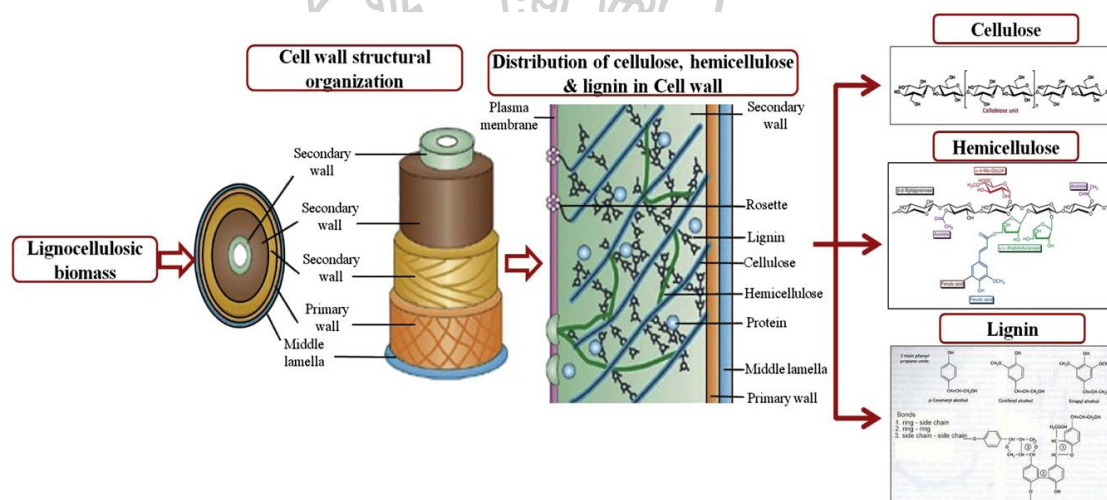
#### 2.4.2.4 ผลของเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเปรียบเสมือนเป็นสิ่งกีดขวางทางกายภาพที่อยู่รอบเส้นใยเซลลูโลส จึงทำหน้าที่ป้องกันเซลลูโลสจากการเข้าทำปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ ซึ่งได้มีการแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่าง ๆ สามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสได้ จึงส่งเสริมให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส อย่างไรก็ตามกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นแบบต่าง ๆ สามารถกำจัดลิกนินได้บางส่วนด้วย ดังนั้นการส่งเสริมให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสจึงไม่ได้เป็นผลมาจากการกำจัดเฮมิเซลลูโลส แต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น (Wyman, 1996) นอกจากนี้การเข้าถึงพื้นผิวสำหรับการเข้าทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ยังมีความสัมพันธ์กับระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน และปริมาณเฮมิเซลลูโลส ทั้งนี้สามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้ด้วยเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสโดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส อย่างไรก็ตามวิธีการปรับสภาพส่วนใหญ่ ซึ่งกำจัดเฮมิเซลลูโลสได้ ก่อให้เกิดการลดความต้องการหรือจำกัดการใช้เอนไซม์เฮมิเซลลูเลสในกระบวนการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลส เช่น การปรับสภาพด้วยกรดเจือจาง (Saha, Iten, Cotta, & Wu, 2005)

## 2.5 ฟางข้าว

ฟางข้าว (Rice straw) เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกข้าว จัดเป็นชีวมวล (Biomass) หรือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ จากข้อมูลการประเมินศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยปี พ.ศ. 2556 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณฟางข้าว 19,005,628.14 ตัน และในส่วนนี้มีปริมาณที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากถึง 10,892,826.89 ตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) ซึ่งเป็นชีวมวลที่มีปริมาณส่วนที่ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์มาก รองจาก ใบและทางปาล์ม และใบและยอดอ้อย ดังตารางที่ 2.8 ซึ่งปัจจุบันมักกำจัดฟางข้าวด้วยวิธีการเผาโดยปราศจากการนำมาใช้ประโยชน์ใด ๆ แต่ในอนาคตหากมีการนำฟางข้าวไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพได้ ฟางข้าวก็จะเป็แหล่งทรัพยากรที่สำคัญในการผลิตพลังงาน

นอกจากนี้ฟางข้าวยังจัดเป็นชีวมวลที่จัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสประเภทหนึ่ง ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (ภาพที่ 2.13) จึงไม่สามารถนำไปผลิตก๊าซชีวภาพได้ อย่างมีประสิทธิภาพหากไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) (รัชพล พะวงศรีรัตน์, 2558; อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)



ภาพที่ 2.13. องค์ประกอบภายในผนังเซลล์พืชแยกตามส่วนต่าง ๆ.

ปรับปรุงจาก “Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept,” โดย V. Menon and M. Rao, 2012, *Progress in Energy and Combustion Science*, 4, น. 525. ลิขสิทธิ์ 2012 โดย Elsevier Ltd.

## ตารางที่ 2.8

## ปริมาณชีวมวลในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556

ชนิดชีวมวล	ปริมาณที่เกิด (ตัน)	ปริมาณที่นำไปใช้ ประโยชน์ (ตัน)	ปริมาณคงเหลือ (ตัน)
ฟางข้าว	19,005,628.14	8,112,801.26	10,892,826.88
แกลบ	8,145,269.20	8,006,283.36	138,985.84
ใบและยอดอ้อย	17,016,248.08	1,845,487.74	15,170,760.34
ชานอ้อย	28,026,761.54	28,026,761.54	-
ยอด ใบและลำต้นข้าวโพด	9,315,603.52	465,780.18	8,849,823.34
ชังข้าวโพด	1,215,078.72	1,094,081.58	120,997.14
เหง้ำมันสำปะหลัง	6,045,508.40	164,196.52	5,881,311.88
กากมันสำปะหลัง	1,813,652.52	1,813,652.52	-
เปลือกมันสำปะหลัง	8,463,711.76	8,463,711.76	-
ลำต้นปาล์มน้ำมัน	1,957,280.00	-	1,957,280.00
ใบและทางปาล์ม	18,065,006.01	1,707,454.87	16,357,551.14
ทะลายปาล์มเปล่า	4,099,859.52	1,891,985.90	2,207,873.62
เส้นใยปาล์ม	2,434,291.59	2,434,291.59	-
กะลาปาล์ม	512,482.44	512,482.44	-
ใบและลำต้นถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง	65,017.48	3,250.87	61,766.61
ตอ ราก และกิ่งก้านไม้ยางพารา	1,094,365.00	218,873.00	875,492.00
ปลายไม้ยางพารา	2,626,476.00	2,626,476.00	-
ปึกไม้ยางพารา	2,626,476.00	2,626,476.00	-
ขี้เลื่อย และเศษไม้ยางพารา	656,619.00	656,619.00	-
จั่น และทะลายมะพร้าว	292,909.57	56,824.46	236,085.11
เปลือก และกาบมะพร้าว	333,310.89	329,976.78	3,334.11
กะลามะพร้าว	252,508.25	230,540.03	21,968.22
เปลือกมะม่วงหิมพานต์	70,038.56	1,674.28	68,364.28
รวม	134,134,102.21	71,289,681.68	62,844,420.53

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก “ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย,” โดย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557, สืบค้นจาก [http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html)

## 2.6 การปรับสภาพวัสดุกลไกโนเซลลูโลส

การปรับสภาพ (Pretreatment) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายวัสดุกลไกโนเซลลูโลส โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้กระบวนการย่อยสลายวัสดุกลไกโนเซลลูโลส เกิดได้เร็วขึ้น เพิ่มความเป็นไปได้ของผลผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ไบโอเอทานอล

(Bioethanol) และไบโอไฮโดรเจน (Biohydrogen) เป็นต้น เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จาก วัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดใหม่ ๆ หรือที่มีอยู่ในท้องถิ่น และป้องกันปัญหาต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นใน กระบวนการย่อยสลายเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการกวนผสม วัสดุภายในถังหมัก และการลอยตัวของวัสดุในถังหมัก เป็นต้น (L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014) แต่ด้วยเหตุที่วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อน การปรับสภาพ วัสดุลิกโนเซลลูโลสจึงไม่สามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ มักขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นสำคัญ ตัวอย่างเช่น การปรับสภาพด้วยกรดเจือจางเป็น วิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเปลือกไม้ของต้นปอปลาร์ (Poplar tree) และใบข้าวโพด แต่วิธี นี้กลับเป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเปลือกไม้ของต้นเมเปิลหอม (Sweetgum) และ ลำต้นข้าวโพด (Corn stalk) (Donghai, Junshe, Ping, & Yanping, 2006; Torget, Himmel, & Grohmann, 1991) เป็นต้น

ทั้งนี้การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง ชีวภาพ สามารถจำแนกออกได้เป็น 4 กระบวนการ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพ ทางเคมี การปรับสภาพทางชีวภาพ และการปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.6.1 การปรับสภาพทางกายภาพ

การปรับสภาพทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีพื้นที่ผิวและ ขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น รวมถึงลดระดับความเป็นโครงสร้างผลึกและจำนวนหน่วยย่อยที่มาประกอบกัน เป็นพอลิเมอร์ของเซลลูโลส (Taherzadeh & Karimi, 2008) การปรับสภาพทางกายภาพสามารถทำ ได้โดยอาศัยวิธีการและเทคโนโลยีต่าง ๆ ดังนี้

#### 2.6.1.1 การปรับสภาพโดยใช้แรงเชิงกล

การปรับสภาพโดยใช้แรงเชิงกลสามารถทำได้โดยวิธีการหั่น (Chipping) การบด (Grinding) หรือการโม่ (Milling) (Kumar et al., 2009) ผ่านเครื่องจักรกลแบบต่าง ๆ เช่น เครื่องโม่บด (Ball mill) เครื่องบดด้วยแรงสั่นสะเทือน (Vibro mill) เครื่องบดด้วยมีด (Knife mill) เครื่องบดแบบหัวค้อน (Hammer mill) เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เครื่องบดแบบ คอลลอยด์ (Colloid mill) เครื่องบดแบบขัดสี (Attrition mill) และเครื่องหั่น (Shredder) เป็นต้น ทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีขนาดเล็กลง เช่น การหั่นทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีขนาดประมาณ 10 – 30 มิลลิเมตร ส่วนการบดหรือการโม่ทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีขนาดประมาณ 0.2 – 2 มิลลิเมตร เป็นต้น (Sun & Cheng, 2002; Y. Zheng et al., 2014)

การเลือกใช้เครื่องจักรกลในการปรับสภาพขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบ โดยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง เครื่องบดแบบหัวค้อน เครื่องบดแบบขัดสี และเครื่องบดด้วยมีด เป็น เครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะแห้ง คือ มีความชื้นร้อยละ 10 – 15 โดยน้ำหนักเปียก

สำหรับเครื่องบดแบบคอลลอยด์ เป็นเครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 15 – 20 โดยน้ำหนักเปียก ส่วนเครื่องโม่บด และเครื่องบดด้วยแรงสั่นสะเทือน สามารถบดวัตถุดิบได้ทั้งวัตถุดิบที่มีลักษณะแห้งและวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง (Kratky & Jirout, 2011; Taherzadeh & Karimi, 2008)

กระบวนการปรับสภาพโดยใช้แรงทางกลนี้เป็นการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสก่อนนำเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพอื่น ๆ หรืออาจเป็นการปรับสภาพก่อนนำเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งการลดขนาดอนุภาคของวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยใช้แรงเชิงกลดังกล่าวเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุลิกโนเซลลูโลส ลดจำนวนหน่วยย่อยที่มาประกอบกันเป็นพอลิเมอร์ จึงช่วยให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์สามารถเข้าถึงโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุลิกโนเซลลูโลสได้ดีขึ้น (Hendriks & Zeeman, 2009; L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014) โดยทั่วไปการปรับสภาพโดยใช้แรงเชิงกลสามารถเพิ่มการไฮโดรไลซิสได้ร้อยละ 5 – 25 ดังนั้นกระบวนการปรับสภาพโดยใช้แรงเชิงกลจึงสามารถลดระยะเวลาการย่อยสลาย ส่งผลให้มีอัตราการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ชนิดของเครื่องจักร และระยะเวลาในการปรับสภาพ) (Delgenés, Penaud, & Moletta, 2003; Hartmann, Angelidaki, & Ahring, 2000) นอกจากนี้การลดขนาดอนุภาคของวัสดุลิกโนเซลลูโลสยังเป็นการช่วยลดความหนืดระหว่างการกวนผสม และลดปัญหาวัสดุลอยตัวภายในถังหมักอีกด้วย สำหรับข้อเสียของวิธีการปรับสภาพโดยใช้แรงเชิงกลคือ เป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูง โดยมีค่าใช้จ่ายถึงร้อยละ 33 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Schell & Harwood, 1994) และเครื่องจักรอาจเกิดการเสียหายเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ในวัสดุลิกโนเซลลูโลส เช่น หิน หรือเศษชิ้นส่วนโลหะ เป็นต้น (L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับขนาดของวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าการลดขนาดของวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ เช่น จากการศึกษาของ Mshandete, Björnsson, Kivaisi, Rubindamayugi, and Mattiasson (2006) พบว่าการตัดสับเส้นใยป่านที่มีขนาด 100 มิลลิเมตร ให้มีขนาด 2 มิลลิเมตร ทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 – 25 ส่วน S. K. Sharma, Mishra, Sharma, and Saini (1988) พบว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าวสาลี ฟางข้าว ใบไม้ และหญ้า มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดวัตถุดิบลดลงจากขนาด 30 มิลลิเมตร เหลือขนาด 0.088 มิลลิเมตร แต่ไม่พบความแตกต่างของผลผลิตก๊าซชีวภาพในวัตถุดิบที่มีขนาดระหว่าง 0.088 – 0.40 มิลลิเมตร และ (Kivaisi & Eliapenda, 1994) พบว่าการลดขนาดขานอ้อย และเส้นใยมะพร้าวจากขนาด 5 มิลลิเมตร จนมีขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร ทำให้มีผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30

แม้ว่าการลดขนาดอนุภาคจะช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ แต่การลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่มากเกินไปก็อาจส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงได้ (Y. Zheng et al., 2014) ดังผลการศึกษาของ De la Rubia, Fernández-Cegri, Raposo, and Borja (2011) ซึ่งพบว่าวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในการทดลองคือ 1.4 – 2.0 มิลลิเมตร ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดคือ 213 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบที่มีขนาด 0.36 – 0.55 และ 0.71 – 1.0 มิลลิเมตร ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีความแตกต่างกันตามขนาดของวัตถุดิบซึ่งเกิดขึ้นจากขั้นตอนการลดขนาดวัตถุดิบ นอกจากนี้การลดขนาดของวัตถุดิบที่มากเกินไปยังส่งผลให้เกิดกรดไขมันระเหยจำนวนมากในระหว่างกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้ยับยั้งกลไกการสร้างก๊าซมีเทน (Izumi et al., 2010) ดังนั้นการลดขนาดอนุภาควัตถุดิบจึงควรมีการศึกษาขนาดที่เหมาะสมเพื่อเป็นผลดีต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และผลผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Y. Zheng et al., 2014) ซึ่ง Schell and Harwood (1994) สรุปว่า วัตถุดิบควรมีขนาดอยู่ระหว่าง 1 – 2 มิลลิเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

### 2.6.1.2 การปรับสภาพโดยใช้อุณหภูมิสูง

การปรับสภาพโดยใช้อุณหภูมิสูงเป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบ ซึ่งโดยทั่วไปมักให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 125 – 190 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับการปรับสภาพโดยใช้ความร้อนในห้องทดลองอาจทำได้โดยใช้หม้ออัดความดัน (Pressure cookers) หม้อนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดัน (Autoclaves) หรือเครื่องให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heaters) โดยวัตถุดิบที่มีลักษณะแห้งจำเป็นต้องเติมน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพด้วยความร้อน เนื่องจากความร้อนและน้ำเป็นปัจจัยในการทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส และทำลายโครงสร้างที่ซับซ้อนของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นผลมาจากการพองตัวด้วยน้ำ (Swell) ของโครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Garrote, Domínguez, & Parajó, 1999; L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014)

อุณหภูมิที่ทำให้โครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลสเริ่มเกิดการละลายคือ อุณหภูมิสูงกว่า 150 – 180 องศาเซลเซียส โดยโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสเป็นโครงสร้างที่เกิดการละลายก่อน และตามด้วยโครงสร้างลิกนิน นอกจากนี้ในระหว่างการละลายของโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสยังทำให้เกิดกรดขึ้น ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการละลายและเกิดการไฮโดรไลซิสโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสต่อไป (Blom et al., 2012) แต่อย่างไรก็ตามควรหลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวก่อให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดในการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน (Brownell, Yu, & Saddler, 1986)



แม้ว่าการปรับสภาพโดยใช้อุณหภูมิสูงจะสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ แต่การปรับสภาพดังกล่าวต้องใช้อุณหภูมิที่เหมาะสม หากอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอาจทำให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพลดลง โดยการปรับสภาพด้วยอุณหภูมิที่สูงมากจะส่งผลให้เกิดสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic compounds) เช่น วานิลลิน (Vanillin) เฟอร์ฟูรัล (Furfural) และไฮดรอกซี-เมทิลเฟอร์ฟูรัล (Hydroxymethylfurfural, HMF) ซึ่งอาจทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานหรือทำให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (Hendriks & Zeeman, 2009; L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014)

## 2.6.2 การปรับสภาพทางเคมี

การปรับสภาพทางเคมีคือการปรับสภาพโดยใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ ในการทำลายโครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Harmsen et al., 2010; L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014) ซึ่งสามารถดำเนินการได้หลายรูปแบบ ดังนี้

### 2.6.2.1 การปรับสภาพโดยใช้ด่าง

การปรับสภาพโดยใช้ด่างเป็นการแตกโครงสร้างที่เชื่อมระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต โดยการแตกโครงสร้างดังกล่าวนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของรูพรุนและพื้นที่ผิวภายใน เกิดการพองตัว (Swelling) ของโครงสร้าง ลดจำนวนหน่วยย่อยที่มาประกอบกันเป็นพอลิเมอร์และระดับความเป็นผลึก ทำลายโครงสร้างของลิกนิน และทำลายพันธะที่เชื่อมต่อระหว่างลิกนินกับพอลิเมอร์อื่น ๆ (Y. Zheng et al., 2014) จึงช่วยเพิ่มความสามารถของเอนไซม์ในการเข้าถึงโครงสร้างเซลลูโลส (Taherzadeh & Karimi, 2008) ซึ่งส่งผลดีต่อการย่อยสลายเซลลูโลสในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ (Hendriks & Zeeman, 2009) สำหรับด่างที่ใช้ในกระบวนการปรับสภาพประกอบด้วยด่างชนิดต่าง ๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, Ca(OH)<sub>2</sub>) สารละลายแอมโมเนีย (Aqueous ammonia, NH<sub>3</sub>) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH<sub>4</sub>OH) เป็นต้น (Blom et al., 2012) แต่โดยทั่วไปมักนิยมใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014) เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส มีราคาต่ำ และสามารถนำกลับคืนแคลเซียมที่ละลายอยู่ในน้ำได้ โดยการสะเทินกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นนำไปป้อนกลับเข้าเตาเผาปูนขาว (Lime kiln) เพื่อผลิตซ้ำ (Regenerate) เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์อีกครั้งหนึ่ง (Kumar et al., 2009) ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสสูง แต่มีราคาค่อนข้างแพง และสามารถนำกลับคืนได้ยาก (Blom et al., 2012)

นอกจากนี้การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังอาจทำให้เกิดโซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอีกด้วย (Y. Zheng et al., 2014)

กระบวนการปรับสภาพโดยใช้ต่างเป็นกระบวนการปรับสภาพที่สามารถดำเนินการได้ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพนานและใช้ต่างความเข้มข้นสูง ตัวอย่างการปรับสภาพโดยใช้ต่าง เช่น การศึกษาของ (Xu, Wang, Jiang, Yang, & Ji, 2007) ได้ทำการปรับสภาพฟางจากต้นถั่วเหลือง (Soybean straw) ด้วยสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าฟางจากต้นถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสลดลงร้อยละ 41.45 และ 30.16 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับฟางต้นถั่วเหลืองที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ

เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าการปรับสภาพโดยใช้ต่างเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น การศึกษาของ Y. He, Pang, Liu, Li, and Wang (2008) พบว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 6 เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นวัตถุดิบในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน Liew, Shi, and Li (2011) พบว่าการปรับสภาพใบไม้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3.5 ก่อนนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทน ทำให้มีผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับใบไม้ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ Song, Yang, Han, Feng, and Ren (2013) พบว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 9.81 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5.89 วัน ทำให้ฟางข้าวมีปริมาณลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสลดลง และให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 225 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย หรือคิดเป็นร้อยละ 74 เมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ

สำหรับสิ่งที่ต้องคำนึงในการปรับสภาพโดยใช้ต่างคือค่าพีเอชที่สูง การปรับสภาพโดยใช้ต่างอาจก่อให้เกิดเกลือหรือเพิ่มค่าพีเอชในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งอาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการปรับสภาพโดยใช้ต่างยังขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่นำมาปรับสภาพและสภาวะของการปรับสภาพ ซึ่งโดยทั่วไปการปรับสภาพโดยใช้ต่างเหมาะกับวัสดุที่มีปริมาณลิกนินต่ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นต้น (Blom et al., 2012)

### 2.6.2.2 การปรับสภาพโดยใช้กรด

การปรับสภาพโดยใช้กรดสามารถแบ่งประเภทตามความเข้มข้นของกรดที่ใช้ได้ออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การปรับสภาพโดยใช้กรดเจือจาง (Dilute acid pretreatment) และการปรับสภาพโดยใช้กรดเข้มข้น (Concentrated acid pretreatment) (Blom et al., 2012;

Taherzadeh & Karimi, 2008) โดยการใช้กรดเข้มข้นมักดำเนินการปรับสภาพในสภาวะอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส) ส่วนการใช้กรดเจือจางมักดำเนินการปรับสภาพในสภาวะอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส) (Blom et al., 2012; Kumar et al., 2009) สำหรับกรดที่ใช้ในการปรับสภาพสามารถใช้ได้ทั้งกรดอนินทรีย์ (Inorganic acids) และกรดอินทรีย์ (Organic acids) เช่น กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) กรดไนตริก (Nitric acid,  $HNO_3$ ) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid,  $H_3PO_4$ ) กรดอะซิติก (Acetic acid,  $CH_3COOH$ ) และกรดมาเลอิก (Maleic acid,  $C_4H_4O_4$ ) เป็นต้น (Y. Zheng et al., 2014)

การปรับสภาพโดยการใช้กรดเป็นการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดต่าง ๆ จึงทำให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์สามารถเข้าถึงโครงสร้างเซลลูโลสได้ดีขึ้น และในระหว่างการปรับสภาพนี้ ลิกนินที่ละลายอยู่จะเกิดการรวมตัวกัน (Condensates) และตกตะกอน (Precipitates) อย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Hendriks & Zeeman, 2009; Mata-Álvarez, 2003) นอกจากนี้การปรับสภาพโดยการใช้กรดเข้มข้นยังมักเกิดสารยับยั้งขึ้นระหว่างการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลส เช่น เฟอร์ฟูรัล (Furfural) และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (Hydroxymethylfurfural, HMF) ซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ (Hendriks & Zeeman, 2009; Modenbach & Nokes, 2012; Mussoline, Esposito, Giordano, & Lens, 2013)

แม้ว่าการปรับสภาพโดยการใช้กรดเข้มข้นจะมีประสิทธิภาพสูงในการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส แต่กรดเข้มข้นมีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษสูง อันตราย และมีค่าใช้จ่ายในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์สูง เช่น ถังปฏิกรณ์ที่ใช้จะต้องมีความเฉพาะและทนต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังต้องมีการนำกลับคืนกรดหลังจากการปรับสภาพ ทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานและมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการปรับสภาพโดยใช้กรดเจือจางจึงเป็นที่นิยมมากกว่าการปรับสภาพโดยการใช้กรดเข้มข้น และมีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง ทำให้การปรับสภาพโดยใช้กรดเจือจางเป็นหนึ่งในวิธีการปรับสภาพทางเคมีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย (Blom et al., 2012; Y. Zheng et al., 2014)

การศึกษาวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับการปรับสภาพโดยใช้กรดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น Badshah, Lam, Liu, and Mattiasson (2012) ได้ทำการปรับสภาพขานอ้อยด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที พบว่าให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 166 เมื่อเปรียบเทียบกับขานอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ Nieves, Karimi, and Horváth (2011) พบว่าการปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 85.7 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้ถึงร้อยละ 40

### 2.6.2.3 การปรับสภาพโดยการออกซิเดชัน

การปรับสภาพโดยการออกซิเดชันคือการปรับสภาพโดยใช้สารออกซิไดซ์ในการปรับสภาพ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide,  $H_2O_2$ ) กรดเพอร์อะซิติก (Peracetic acid,  $C_2H_4O_3$ ) และโอโซน (Ozone,  $O_3$ ) เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์ของการปรับสภาพคือเพื่อกำจัดลิกนิน (Delignification) (Blom et al., 2012; Hendriks & Zeeman, 2009)

สารออกซิไดซ์มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีกับวงแหวนอะโรมาติกของลิกนิน โครงสร้างลิกนินจึงถูกเปลี่ยนเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids) (Harmsen et al., 2010; Panagiotou & Olsson, 2007) แต่การเกิดกรดคาร์บอกซิลิกดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุของการยับยั้งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนตามมา ดังนั้นจึงต้องมีการทำให้วัตถุดิบเป็นกลางหรือกำจัดกรดที่เกิดขึ้นก่อนนำวัตถุดิบไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และนอกจากการกำจัดลิกนินแล้ว การปรับสภาพโดยการออกซิเดชันยังมีผลต่อเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลสอีกด้วย เนื่องจากสารออกซิไดซ์ไม่สามารถเลือกส่วนที่ต้องการออกซิไดซ์ได้ ทำให้อาจเกิดการสูญเสียเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วน ซึ่งหมายความว่าเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลสส่วนนั้นจะไม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ (Blom et al., 2012; Hendriks & Zeeman, 2009; Hon & Shiraiishi, 2001) แต่มีบางการศึกษา เช่น Teixeira, Linden, and Schroeder (1999) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้กรดเพอร์อะซิติกในการปรับสภาพต้นปอปลาร์พันธุ์ผสมและชานอ้อย ที่อุณหภูมิห้อง พบว่ากรดเพอร์อะซิติกมีการเลือกลิกนินสูง และไม่เกิดการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปรับสภาพโดยใช้กรดเพอร์อะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 21 จึงทำให้มีการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.8 เป็นร้อยละ 98

### 2.6.3 การปรับสภาพทางชีวภาพ

การปรับสภาพทางชีวภาพโดยส่วนใหญ่เป็นการปรับสภาพโดยใช้รา จุลินทรีย์ และเอนไซม์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับสภาพทางกายภาพ และทางเคมี พบว่า การปรับสภาพทางชีวภาพมีการใช้พลังงานน้อยกว่า และไม่มีการใช้สารเคมี นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการปรับสภาพที่ดำเนินการภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อ่อนโยนกว่า ดังนั้นจึงเกิดสารยับยั้งที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการปรับสภาพทางชีวภาพต้องใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ (Taherzadeh & Karimi, 2008) ทั้งนี้การปรับสภาพทางชีวภาพมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดการสูญเสียคาร์โบไฮเดรต และเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินในวัสดุลิกโนเซลลูโลส ทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีความสามารถในการย่อยสลายเพิ่มมากขึ้น (Y. Zheng et al., 2014) ซึ่งการปรับสภาพทางชีวภาพทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีต่าง ๆ ดังนี้

### 2.6.3.1 การปรับสภาพโดยใช้รา

งานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับสภาพโดยใช้ราส่วนใหญ่เป็นการศึกษาถึงราที่มีความเฉพาะเจาะจงในการย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ทำการศึกษารังไรที่มีความเฉพาะในการย่อยสลายเซลลูโลส เนื่องจากเซลลูโลสเป็นโครงสร้างที่ทนทานต่อการย่อยสลายโดยใช้รามากกว่าองค์ประกอบอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสก็มีผลทำให้เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Y. Zheng et al., 2014)

การปรับสภาพโดยใช้ราเป็นวิธีการปรับสภาพที่มักดำเนินการภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ (Y. Zheng et al., 2014) สำหรับราที่นิยมนำมาใช้ในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ราฟลูสีน้ำตาล (Brown-rot fungi) ราฟลูสีขาว (White-rot fungi) และราฟลูอ่อน (Soft-rot fungi) โดยราฟลูสีขาวเป็นราที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด (Sun & Cheng, 2002)

การศึกษาวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับการปรับสภาพโดยใช้ราต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น Mackul'ak, Prousek, Švorc, and Dřtil (2012) ใช้รา *Auricularia auricula-judae* ซึ่งเป็นราที่ทำให้ไม้ผุ (Decay fungi) ชนิดหนึ่ง ในการปรับสภาพไบโแก๊สและหญ้าแห้งที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 – 5 วัน ผลการศึกษาพบว่า การปรับสภาพไบโแก๊สและหญ้าแห้งที่มีอัตราส่วนของไบโแก๊สและหญ้าแห้งเท่ากับ 1:2 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ Take et al. (2006) ได้ศึกษาผลของการปรับสภาพโดยใช้ราต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากเศษไม้ซีดาร์ญี่ปุ่น และพบว่าการปรับสภาพไม้ซีดาร์ญี่ปุ่นโดยใช้รา *Cyathus stercoreus* AW 03-72 และ *Trametes hirsute* NBRC 4917 ให้ผลผลิตมีเทน 30 – 43 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งทั้งหมด ส่วนตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตมีเทนน้อยมาก Amirta et al. (2006) ได้ทำการศึกษารับสภาพเศษไม้ซีดาร์ญี่ปุ่นโดยใช้รา 4 ชนิด พบว่า การปรับสภาพโดยใช้รา *Ceriporiopsis subvermispota* ATCC 90467 ร่วมกับสารอาหาร เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุด และให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพถึง 4 เท่า Zhao (2013) พบว่าผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 157 เมื่อใช้เศษไม้และหญ้าจากการตัดแต่งสวนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยรา *C. subvermispota* ATCC 96608 เป็นระยะเวลา 30 วัน ที่ความชื้นร้อยละ 60 โดยไม่มีการเติมอากาศเพิ่มเติม นอกจากนี้ Muthangya, Mshandete, and Kivaisi (2009) ยังได้ทำการศึกษารับสภาพป่านครนารายณ์โดยใช้ราแบบสองขั้นตอน โดยใช้รา CCHT-1 ตามด้วยรา *Trichoderma reesei* fungi ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 – 101 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

### 2.6.3.2 การปรับสภาพโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์

การปรับสภาพโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ดำเนินการโดยคัดเลือกจุลินทรีย์จากวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ฝังในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติมาเป็นจุลินทรีย์ตั้งต้น โดยทั่วไปการปรับสภาพโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์มีความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูง ซึ่งตรงข้ามกับการปรับสภาพโดยใช้ราที่มีความสามารถหลักคือการย่อยสลายลิกนิน นอกจากนี้การปรับสภาพโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ยังเป็นการปรับสภาพที่ไม่จำเป็นต้องทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสปลอดเชื้อก่อนการปรับสภาพ ซึ่งต่างจากการปรับสภาพโดยใช้ราที่ต้องดำเนินการภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ (Y. Zheng et al., 2014)

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับสภาพโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น Q. Zhang et al. (2011) ได้คัดเลือกกลุ่มจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูงจากแหล่งต่าง ๆ เช่น จากกองฟางที่กำลังย่อยสลาย และจากหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย แล้วนำกลุ่มจุลินทรีย์จากแหล่งต่าง ๆ มารวมกัน และผสมกับน้ำเสีย หลังจากนั้นนำไปปรับสภาพกากมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่ากากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึงร้อยละ 96

นอกจากการคัดเลือกจุลินทรีย์ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติมาเป็นจุลินทรีย์ตั้งต้นแล้ว ยังสามารถใช้กลุ่มจุลินทรีย์สายพันธุ์บริสุทธิ์จากยีสต์และแบคทีเรียในการปรับสภาพได้อีกด้วย ดังการศึกษาของ Q. Zhang et al. (2011) ที่ทำการบ่มจุลินทรีย์บริสุทธิ์กับฟางข้าวโพดที่ปราศจากเชื้อเป็นระยะเวลา 15 วัน ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ฟางข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 75 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และสามารถลดระยะเวลาการย่อยสลายได้ร้อยละ 34.6

### 2.6.3.3 การปรับสภาพโดยใช้เอนไซม์

ขั้นตอนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่กำหนดว่ากระบวนการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วเพียงใด (Rate-limiting step) (Romano, Zhang, Teter, & McGarvey, 2009) ดังนั้นเพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุลิกโนเซลลูโลสจึงได้มีการประยุกต์เอนไซม์เพื่อส่งเสริมขั้นตอนการไฮโดรไลซิสในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) และเอนไซม์เฮมิเซลลูเลส (Hemicellulase) (Y. Zheng et al., 2014) แต่โดยส่วนใหญ่เอนไซม์มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยมาก และมีราคาสูง ดังนั้นการปรับสภาพโดยใช้เอนไซม์จึงมีข้อจำกัด อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาการใช้สารสกัดปุ๋ยหมักจากเห็ดกับเอนไซม์แลกเคส (Laccase) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส ในการปรับสภาพกากตะกอน

จากโรงงานกระดาษและเยื่อ ผลการศึกษาพบว่า ให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 34.2 (Y. Lin, Wang, & Wang, 2010) ซึ่งดูเหมือนว่าวิธีการดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพเพียงแค่ 4 ชั่วโมง และเอนไซม์ที่ใช้มีราคาถูก

#### 2.6.4 การปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสาน

การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยวิธีทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ เป็นวิธีที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน แต่การย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ระดับความเป็นผลึกของโครงสร้างเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน และพันธะที่เชื่อมต่อกันระหว่างโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสกับลิกนิน เป็นต้น การปรับสภาพโดยใช้วิธีการปรับสภาพวิธีใดวิธีหนึ่งจึงอาจให้ผลที่ไม่มีประสิทธิภาพ การปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสานโดยรวมวิธีการปรับสภาพ 2 วิธี หรือมากกว่า 2 วิธี เข้าด้วยกัน (Y. Zheng et al., 2014) จึงเป็นวิธีการปรับสภาพที่ได้รับความนิยม ตัวอย่างของการปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสานมีรายละเอียดดังนี้

##### 2.6.4.1 การปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำ

การปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นวิธีการปรับสภาพที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไปในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส (McMillan, 1994) เป็นการทำให้วัตถุดิบย่อยสลายได้มากขึ้นโดยใช้ไอน้ำอิมมัตวที่ความดันสูง และลดความดันลงอย่างรวดเร็ว โดยระบายความดันออกทันที หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 5 – 60 นาที (L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014) ส่งผลให้วัตถุดิบเกิดการระเบิดขึ้นเนื่องจากการลดความดัน การปรับสภาพโดยระเบิดด้วยไอน้ำมักใช้อุณหภูมิ 160 – 260 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 0.69 – 4.83 เมกะปาสกาล (Sun & Cheng, 2002) ระหว่างที่วัตถุดิบผสมกับไอน้ำในช่วงแรกของการปรับสภาพคือช่วงของการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลส ส่วนช่วงสุดท้ายของการปรับสภาพ วัตถุดิบจะเกิดการระเบิดขึ้นเนื่องจากการลดความดัน ทำให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนินเนื่องจากอุณหภูมิสูง การปรับสภาพโดยระเบิดด้วยไอน้ำจึงเป็นการเพิ่มศักยภาพการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังเช่นงานวิจัยของ Grous, Converse, and Grethlein (1986) ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพเศษไม้ปอปลาร์โดยการระเบิดด้วยไอน้ำพบว่า เศษไม้ปอปลาร์ที่ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ถึงร้อยละ 90 ส่วนเศษไม้ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสเพียงร้อยละ 15

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำ ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ อุณหภูมิ ขนาดของวัตถุดิบ และความชื้นของวัตถุดิบที่นำมาปรับสภาพ โดยการละลายและไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสที่ดีที่สุดสามารถทำได้โดยใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลาสั้น เช่น ปรับสภาพโดยใช้อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที หรือทำโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า

และใช้ระยะเวลาที่นานขึ้น เช่น การปรับสภาพโดยใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที (Duff & Murray, 1996) และจากการศึกษาของ Wright (1988) พบว่าการปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าและใช้ระยะเวลานานให้ผลที่ดีกว่า นอกจากนี้การเติมกรดซัลฟิวริก ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ ลดการผลิตสารยับยั้ง และทำให้เกิดการกำจัด เฮมิเซลลูโลสที่สมบูรณ์ขึ้น (Morjanoff & Gray, 1987)

ข้อดีของการปรับสภาพโดยระเบิดด้วยไอน้ำ ได้แก่ มีความต้องการพลังงานต่ำ โดยมีความต้องการพลังงานต่ำกว่าการปรับสภาพเชิงกลถึงร้อยละ 70 ไม่ต้องมีการบำบัดของเสีย และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Holtzapfel, Humphrey, & Taylor, 1989) ส่วนข้อจำกัดของการปรับสภาพโดยระเบิดด้วยไอน้ำ คือ โครงสร้างไซแลนบางส่วนถูกทำลาย การสลายโครงสร้าง ลิกนิน – คาร์โบไฮเดรตเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ และเกิดสารประกอบที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ (Mackie, Brownell, West, & Saddler, 1985) และเนื่องจากการสร้างสารประกอบที่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การทำงานของเอนไซม์ไฮโดรไลซิส และกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นควรล้างวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยน้ำเพื่อกำจัดสารยับยั้งต่าง ๆ ออกจากวัตถุดิบ (McMillan, 1994) แต่อย่างไรก็ตามการล้างวัตถุดิบด้วยน้ำก็เป็นการทำให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยรวมลดลงเนื่องจากน้ำตาลที่สามารถละลายได้ถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการล้าง ซึ่งอาจถูกกำจัดออกไปถึงร้อยละ 20 – 25 (Mes-Hartree, Dale, & Craig, 1988)

#### 2.6.4.2 การปรับสภาพโดยใช้เคมีร่วมกับความร้อน

การปรับสภาพโดยใช้เคมีร่วมกับความร้อนเป็นการปรับสภาพวัตถุดิบโดยใช้สารเคมีและความร้อน ซึ่งสามารถใช้สารเคมีได้ทั้งชนิดที่เป็นกรดและชนิดที่เป็นด่าง โดยมักดำเนินการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 60 – 220 องศาเซลเซียส สำหรับการปรับสภาพโดยเคมีร่วมกับความร้อนด้วยกรดและอุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส เป็นการปรับสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อวัตถุดิบประเภทวัสดุลิกโนเซลลูโลส ส่วนการปรับสภาพโดยเคมีร่วมกับความร้อนด้วยด่างและอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นการปรับสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อวัตถุดิบที่มีปริมาณลิกนินสูง หรือวัตถุดิบที่ประกอบด้วยฟีนอลจำนวนมาก (L. F. R. Montgomery & Bochmann, 2014)

งานวิจัยที่ทำการศึกษากการปรับสภาพโดยใช้สารเคมีร่วมกับความร้อนเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น (Q. Zhang et al., 2011) ศึกษาการใช้มันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทน พบว่ามันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่ามันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึงร้อยละ 57 Rafique et al. (2010) ศึกษาการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยเคมีร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการปรับสภาพวัตถุดิบ



ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว พบว่า การปรับสภาพทางเคมีร่วมกับ ความร้อนให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการปรับสภาพด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวถึงร้อยละ 60



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียมและการปรับสภาพฟางข้าว

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่างฟางข้าวและการปรับสภาพฟางข้าว ได้แก่

1. เครื่องบด (Cutting mill) ของ Retsch รุ่น SM 2000
2. ตะแกรงร่อนตัวอย่าง (Sieve) ของ ELE international ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร
3. เครื่องชั่ง (Analytical balance)
  - ความละเอียด 10 กรัม ของ OHAUS รุ่น Defender 3000
  - ความละเอียด 5 กรัม ของ Mettler – Toledo รุ่น BBA211-5BA30
  - ความละเอียด 0.01 กรัม ของ Mettler – Toledo รุ่น PB3002
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของ Schott รุ่น Lab 850
5. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ที่ระดับอุณหภูมิ  $60 \pm 2$   $70 \pm 2$   $80 \pm 2$  และ  $90 \pm 2$  องศาเซลเซียส
6. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ของ Thermolyne hot plate รุ่น 2200
7. เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น บีกเกอร์ (Beaker) ขวดแก้วเก็บสารละลาย (Laboratory bottle) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) กระจกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle) ถังพลาสติกพร้อมฝาปิด ขนาด 60 ลิตร ถังกรองขนาดรูพรุน 80 ไมครอน เป็นต้น

##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ฟางข้าว

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว มีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก และภาคผนวก ข

##### 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว ได้แก่

1. ตู้บ่มเชื้อและควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) ของ WIB Binder รุ่น KBW
2. ก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 ของบริษัท แมสเซอร์ สเปเชียลตี้ ก๊าซ จำกัด
3. ขวดแก้วเก็บสารละลาย (Laboratory bottle) ขนาด 500 มิลลิลิตร ของ Duran

4. ฝาพลาสติกชนิดเกลียวมีรู (Plastic screw-cap with aperture) ขนาด GL 45 ของ Duran
5. แผ่นยางซิลิโคน (Silicone disc) ขนาด GL 45 ของ Duran
6. เข็มฉีดยา (Needle) เบอร์ 27G ความยาว 1 นิ้ว ของ Nipro
7. ข้อต่อสามทางที่มีวาล์วควบคุม (3-way stopcock)
8. เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ป้อนน้ำ สายยาง และกระบอกตวง หัวกระจายก๊าซ

เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ และการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก จ ภาคผนวก ฉ และภาคผนวก ช ตามลำดับ

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.2.1 สารเคมีสำหรับการปรับสภาพฟางข้าว

สารเคมีสำหรับการปรับสภาพฟางข้าว ได้แก่ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 ซึ่งมีรายละเอียดของการเตรียมสารเคมีแสดงในภาคผนวก ก

#### 3.2.2 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ฟางข้าว

สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว ใช้สารเคมีระดับงานวิเคราะห์ (Analytical grade) ซึ่งสามารถดูรายละเอียดของสารเคมีและการเตรียมสารเคมีได้ในภาคผนวก ข และภาคผนวก ค

#### 3.2.3 สารเคมีสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว

สารเคมีที่ใช้สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว ได้แก่ น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน แอมโมเนียมคลอไรด์ โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โซเดียมไบคาร์บอเนต สารละลายไทมอลฟทาลินร้อยละ 0.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 นอร์แมล ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการเตรียมสารเคมีแสดงในภาคผนวก ง นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์และการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ซึ่งมีรายละเอียดของสารเคมีและวิธีการเตรียมสารเคมีแสดงในภาคผนวก จ ภาคผนวก ฉ และภาคผนวก ช ตามลำดับ

### 3.3 ฟางข้าวที่ใช้ในการศึกษา

ฟางข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ฟางของข้าวสายพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ในพื้นที่นาข้าวของตำบลวันดาว อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดราชบุรี ซึ่งเป็นฟางข้าวที่ได้จากการเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2558 และถูกอัดเป็นก้อนโดยเครื่องจักร ซึ่งฟางข้าวแต่ละก้อนมีขนาดโดยประมาณคือ กว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร โดยในการศึกษานี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างฟางข้าวอัดก้อนดังกล่าวในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2559 จำนวน 6 ก้อน (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1. ฟางข้าวอัดก้อนที่นำมาใช้ในการศึกษา.

### 3.4 การเตรียมตัวอย่างฟางข้าว

หลังจากเก็บตัวอย่างฟางข้าว ทำการเตรียมตัวอย่างฟางข้าวโดยนำฟางข้าวอัดก้อนอบให้แห้งในตู้อบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ  $60 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่หลงเหลืออยู่ หลังจากนั้นตัดสับฟางข้าวด้วยเครื่องบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่อง 2.0 และขนาด 0.5 มิลลิเมตร เพื่อคัดขนาดฟางข้าวให้มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 – 2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นผสมคลุกเคล้าตัวอย่างฟางข้าวให้เข้ากันดี และเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ และศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี โดยตัวอย่างฟางข้าวที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างฟางข้าวนี้เรียกว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated rice straw, Untreated)

### 3.5 การปรับสภาพฟางข้าว

การปรับสภาพฟางข้าวทำโดยนำฟางข้าวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างจากข้อ 3.4 มาปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) และแต่ละความเข้มข้นใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ 3 6 และ 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) และแต่ละความเข้มข้นใช้อุณหภูมิในการปรับสภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสภาวะต่าง ๆ ของการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 ส่วนรายละเอียดของวิธีการปรับสภาพฟางข้าวแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.1

สภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ลำดับที่	สภาวะการปรับสภาพ	ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์	ระยะเวลา	อุณหภูมิ
1	5%-3d	ร้อยละ 5	3 วัน	อุณหภูมิห้อง
2	5%-6d	ร้อยละ 5	6 วัน	อุณหภูมิห้อง
3	5%-12d	ร้อยละ 5	12 วัน	อุณหภูมิห้อง
4	10%-3d	ร้อยละ 10	3 วัน	อุณหภูมิห้อง
5	10%-6d	ร้อยละ 10	6 วัน	อุณหภูมิห้อง
6	10%-12d	ร้อยละ 10	12 วัน	อุณหภูมิห้อง
7	15%-3d	ร้อยละ 15	3 วัน	อุณหภูมิห้อง
8	15%-6d	ร้อยละ 15	6 วัน	อุณหภูมิห้อง
9	15%-12d	ร้อยละ 15	12 วัน	อุณหภูมิห้อง
10	5%-70C	ร้อยละ 5	2 ชั่วโมง	70 องศาเซลเซียส
11	5%-80C	ร้อยละ 5	2 ชั่วโมง	80 องศาเซลเซียส
12	5%-90C	ร้อยละ 5	2 ชั่วโมง	90 องศาเซลเซียส
13	10%-70C	ร้อยละ 10	2 ชั่วโมง	70 องศาเซลเซียส
14	10%-80C	ร้อยละ 10	2 ชั่วโมง	80 องศาเซลเซียส
15	10%-90C	ร้อยละ 10	2 ชั่วโมง	90 องศาเซลเซียส
16	15%-70C	ร้อยละ 15	2 ชั่วโมง	70 องศาเซลเซียส
17	15%-80C	ร้อยละ 15	2 ชั่วโมง	80 องศาเซลเซียส
18	15%-90C	ร้อยละ 15	2 ชั่วโมง	90 องศาเซลเซียส

### 3.6 การวิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว เป็นการนำตัวอย่างฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) และตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ มาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังที่ระบุในตารางที่ 3.2 โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ในทุกพารามิเตอร์ สำหรับรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์แสดงดังภาคผนวก ข และภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.2

พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ และองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
<b>สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ</b>	
1. ความชื้น (Moisture content, MC)	Gravimetric method
2. ของแข็งรวม (Total solids, TS)	อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
3. ของแข็งระเหย (Volatile solids, VS)	เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
4. เถ้าหรือของแข็งคงตัว (Ash or Fixed solids)	เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
5. อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon, OC)	Walkley and Black method
6. ไนโตรเจนรวม (Total nitrogen, TN)	Macro-Kjeldahl method
7. ฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorus, TP)	ย่อยด้วยกรดผสมระหว่าง $\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HClO}_4$ อัตราส่วน 3 : 1 : 1
8. ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)	วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux method)
9. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N ratio)	จากการคำนวณ
10. สัณฐานวิทยาของฟางข้าว (Morphology of rice straw)	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
<b>องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ</b>	
1. สารแทรก (Extractives)	สกัดด้วยอะซีโตน
2. เซลลูโลส (Cellulose)	จากการคำนวณ
3. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	ย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
4. ลิกนิน (Lignin)	ไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟูริก

### 3.7 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เป็นการนำตัวอย่างฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ มาทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธี Biochemical methane potential (BMP) หรือบีเอ็มพี ซึ่งดำเนินการตามวิธีของ Angelidaki et al. (2009) และ Hansen et al. (2004) โดยดำเนินการทดลองแบบแบตช์

สำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) ที่นำมาใช้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของฟางข้าวในการศึกษานี้ คือ ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบยูเอเอสบี (Up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) ของบริษัท โรงเส้นหมี่ขอเฮง จำกัด จังหวัดนครปฐม ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเม็ด (Granule) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05 – 0.20 มิลลิเมตร มีสีดำและเงา (ภาพที่ 3.2)



ภาพที่ 3.2. ลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท โรงเส้นหมี่ขอเฮง จำกัด.

ก่อนนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาใช้ในการทดลอง ทำการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์และบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น ตามรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก จ. หลังจากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางเคมี-กายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ปริมาณของแข็งรวม (Total solids, TS) ปริมาณของแข็งระเหย (Total volatile solids, VS) และปริมาณเถ้าหรือของแข็งคงตัว (Ash or Fixed solids, FS) ตามรายละเอียดวิธีวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก จ ซึ่งทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ในทุกพารามิเตอร์ และมีผลการวิเคราะห์แบ่งตามเขตของการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3

## ตารางที่ 3.3

สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาในการทดลองแต่ละเขต

พารามิเตอร์	เขตที่ 1	เขตที่ 2	เขตที่ 3	เขตที่ 4	เขตที่ 5
พีเอช	7.25	7.07	7.17	7.04	7.19
ของแข็งรวม (กรัมต่อลิตร)	96.09 ± 9.79	83.25 ± 5.07	78.65 ± 2.45	77.22 ± 3.71	81.62 ± 4.20
ของแข็งระเหย (กรัมต่อลิตร)	89.83 ± 9.19	78.09 ± 4.70	73.52 ± 2.30	72.10 ± 3.48	76.42 ± 3.95
ของแข็งคงตัว (กรัมต่อลิตร)	6.26 ± 0.60	5.16 ± 0.37	5.13 ± 0.15	5.12 ± 0.23	5.20 ± 0.24

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวแต่ละตัวอย่างจำนวน 5 กรัมของแข็งระเหย ใส่ลงในขวดแก้วเก็บสารละลายขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ จำนวน 1.00 กรัม และโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต จำนวน 0.30 กรัม เพื่อให้วัสดุตั้งต้นมีอัตราส่วนของปริมาณ ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส เท่ากับ 100 : 5 : 1 (Eskicioglu & Ghorbani, 2011)
3. เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต จำนวน 2.70 กรัม เพื่อให้ของผสมภายในขวดมีปริมาณความเป็นด่างเริ่มต้นประมาณ 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (McCarty, 1964)
4. เติมน้ำกลั่น จำนวน 200 มิลลิลิตร
5. แก้วขวดเบา ๆ เพื่อให้ของผสมภายในขวดผสมเข้ากันดี
6. พันก๊าซไนโตรเจนลงในของผสมเพื่อให้ไนโตรเจนแทนที่ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในของผสม ทำให้ของผสมภายในขวดปราศจากออกซิเจน
7. เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบ่มเบื้องต้นแล้ว (ตามที่ระบุในภาคผนวก ง) จำนวน 10 กรัมของแข็งระเหย (อัตราส่วน หัวเชื้อจุลินทรีย์ : วัสดุตั้งต้น เท่ากับ 2 : 1 โดยน้ำหนักของแข็งระเหย)
8. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากออกซิเจน ให้ของผสมภายในขวดมีปริมาตร 400 มิลลิลิตร
9. แทนที่ช่องว่างเหนือของผสมภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นระยะเวลาประมาณ 1 นาที

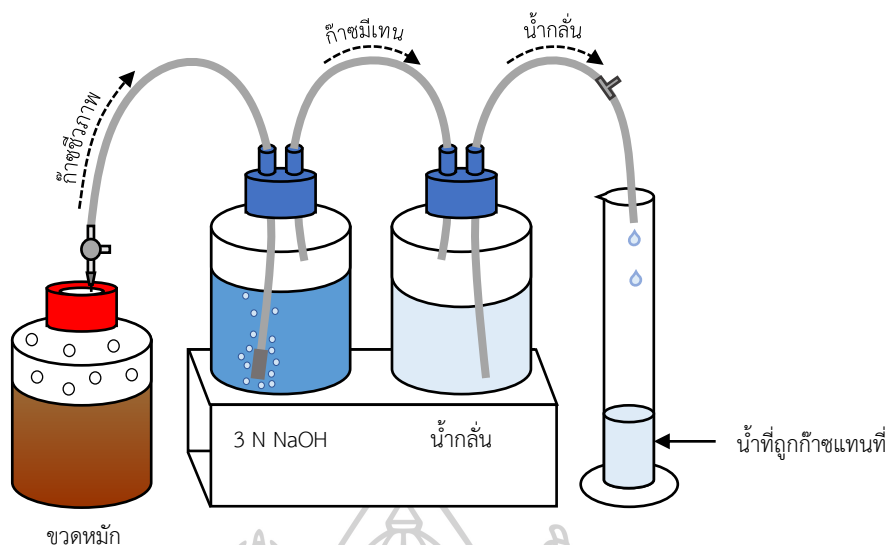


10. ปิดฝาขวดด้วยฝาพลาสติกชนิดเกลียวมีรูพร้อมแผ่นยางซิลิโคน 2 ชั้น
11. เเจาะเข็มที่ต่ออยู่กับข้อต่อสามทางและสายยาง สำหรับใช้ในการวัดปริมาณก๊าซมีเทน
12. นำเข้าตู้บ่มที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วัน (ภาพที่ 3.3)
13. วัดปริมาณก๊าซมีเทนโดยใช้ด้วยชุดวัดปริมาณก๊าซมีเทนซึ่งให้หลักการแทนที่ด้วยต่างและน้ำ (Alkaline and water displacement) (ภาพที่ 3.4) โดยวัดปริมาณก๊าซมีเทนทุกวันในช่วงสัปดาห์แรกของการย่อยสลาย หลังจากนั้นเมื่อก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยลง จึงทำการวัดปริมาณก๊าซมีเทนทุก ๆ 2 – 3 วัน
14. ดำเนินการเช่นเดียวกันกับข้อ 1. – 13. โดยฟางข้าวแต่ละตัวอย่างทำจำนวน 3 ซ้ำ
15. ทำชุดควบคุม (Control) (ไม่ใช่ตัวอย่างฟางข้าว) โดยปฏิบัติเช่นเดียวกันกับ ข้อ 2. – 13. จำนวน 3 ซ้ำ
16. ดำเนินการเช่นเดียวกันกับข้อ 1. – 12. โดยแต่ละตัวอย่างทำจำนวน 8 ขวด เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทน ในระหว่างการย่อยสลาย 30 วัน ซึ่งมีรายละเอียดกล่าวอยู่ในลำดับถัดไป

นำข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนได้จากการวัดด้วยหลักการแทนที่ด้วยต่างและน้ำมาคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่อุณหภูมิ  $35$  องศาเซลเซียส ซึ่งได้จากผลต่างระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดทดลอง (วัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์) และปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดควบคุม (หัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว)



ภาพที่ 3.3. ขวดหมักที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.



ภาพที่ 3.4. ชุดการวัดปริมาณก๊าซมีเทนโดยใช้หลักการแทนที่ด้วยต่างและน้ำ.

จากนั้นคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure, STP) คือ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ โดยนำข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (ผลต่างระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดทดลองและชุดควบคุม) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มาคำนวณตามสมการที่ 5

$$V_0 = \frac{V \times P \times T_0}{P_0 \times T}$$

สมการที่ 5

- โดย  $V_0$  = ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่สภาวะมาตรฐาน (มิลลิลิตรมาตรฐาน)  
 $V$  = ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทดลอง (มิลลิลิตร)  
 $T_0$  = อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน (เคลวิน)  
 $T$  = อุณหภูมิที่สภาวะทดลอง (เคลวิน)  
 $P_0$  = ความดันที่สภาวะมาตรฐาน (บรรยากาศ)  
 $P$  = ความดันที่สภาวะทดลอง (บรรยากาศ)

หาค่ากักเก็บการผลิตก๊าซมีเทนจากการคำนวณผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม (Cumulative methane yield) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐานตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย) โดยนำข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทน

สะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน มาคำนวณตามสมการที่ 6

$$BMP = \frac{V_0}{VS_{\text{substrate}}} \quad \text{สมการที่ 6}$$

โดย BMP = ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย)  
 $V_0$  = ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม ที่สภาวะมาตรฐาน (มิลลิลิตรมาตรฐาน)  
 $VS_{\text{substrate}}$  = ปริมาณของแข็งระเหยของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ (กรัม)

### 3.8 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ โดยนำผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมซึ่งเกิดขึ้นจากการย่อยสลายของฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ ในชุดทดลอง ที่สภาวะมาตรฐาน ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน มาทำการทดสอบความเหมาะสม (Model fitting) ของการถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear regression) กับสมการ Modified Gompertz ดังสมการที่ 4 ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.2) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear least-square regression analysis) โดยใช้เครื่องมือ (Tool) ในโปรแกรม Microsoft® Excel® 2016 ที่เรียกว่า Solver ซึ่งจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจะทำให้ทราบถึงผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทำนาย และพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ( $\mu_m$ ) และระยะพัก ( $\lambda$ ) ของการย่อยสลายฟางข้าว

### 3.9 การศึกษาปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว

การศึกษาปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวเพื่อผลิตก๊าซมีเทน เป็นการวิเคราะห์ของผสมภายในขวดหมักของชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และของชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ ในระหว่างการย่อยสลาย 30 วัน ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดของการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์แสดงดังภาคผนวก ข และมีรายละเอียดของการศึกษาดังนี้

ทำการสุ่มขวดหมักในชุดทดลองของฟางข้าวแต่ละชุด จำนวน 1 ขวด ในวันที่ 0 2 4 8 16 24 และ 30 ของการย่อยสลาย และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณความเป็นด่าง ปริมาณกรดไขมันระเหย ผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน และปริมาณซีโอดีละลาย โดยทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ในทุกพารามิเตอร์ ส่วนปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณของแข็งคงตัว ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ โดยสุ่มขวดหมักในชุดทดลองของฟางข้าวแต่ละชุด จำนวน 1 ขวด ในวันที่ 0 และวันที่ 30 ของการย่อยสลาย มาทำการวิเคราะห์

#### ตารางที่ 3.4

พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
1. พีเอช (pH)	เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
2. ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk)	Titration method
3. กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids, VFAs)	Esterification method
4. ผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonium nitrogen + ammonia nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NH}_3\text{-N}$ )	Kjeldahl method
5. ซีโอดีละลาย (Soluble chemical oxygen demand, SCOD)	รีฟลักซ์แบบปิด (Close reflux method) และวิธีการเทียบสี (Colorimetric method)
6. ของแข็งรวม (Total solids, TS)	อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
7. ของแข็งระเหย (Volatile solids, VS)	เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
8. เถ้าหรือของแข็งคงตัว (Ash or Fixed solids, FS)	เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

#### 3.10 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การศึกษานี้มีการวิเคราะห์ข้อมูลในด้านต่าง ๆ ได้แก่

1. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ ได้แก่ ของแข็งรวม ของแข็งระเหย เถ้าหรือของแข็งคงตัว อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจนรวม ฟอสฟอรัสรวม ซีโอดี ของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว (One-way analysis of variance, One-way ANOVA) เพื่อทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าวแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 หรือไม่ โดยมีสมมติฐานว่าข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ มีความแปรปรวนเท่ากัน และกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน หากทดสอบแล้วพบว่าค่าเฉลี่ยของสมบัติทางเคมีกายภาพมีความแตกต่างกัน จะทำการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวอย่างฟางข้าวใดที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเชิงพหุตามวิธีของ Duncan's multiple-range test ภายใต้ระดับนัยสำคัญ .05

2. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขององค์ประกอบทางเคมีกายภาพบางประการ ได้แก่ สารแทรก เหมิเซลลูโลส และลิกนิน ของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว (One-way analysis of variance, One-way ANOVA) เพื่อทดสอบว่าค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าวแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 หรือไม่ โดยมีสมมติฐานว่าข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ มีความแปรปรวนเท่ากัน และกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน หากพบว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกัน จะทำการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมีกายภาพของตัวอย่างฟางข้าวใดที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเชิงพหุตามวิธีของ Duncan's multiple-range test ภายใต้ระดับนัยสำคัญ .05

3. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช ความเป็นด่าง กรดไขมันระเหย ผลรวมของแอมโมเนียไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน ซีไอทีละลาย ของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว

4. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของปริมาณก๊าซมีเทนรายวันและปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ และชุดควบคุมของฟางข้าวแต่ละสภาวะ ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

5. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน ของชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

6. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน (ระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน) และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว (One-way analysis of variance, One-way ANOVA)

เพื่อทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของฟางข้าวแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 หรือไม่ โดยมีสมมติฐานว่าข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ มีความแปรปรวนเท่ากัน และกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน หากพบว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกัน จะทำการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐานของตัวอย่างฟางข้าวใดที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเชิงพหุตามวิธีของ Duncan's multiple-range test ภายใต้ระดับนัยสำคัญ .05



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

การศึกษาผลของการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตก๊าซมีเทนของฟางข้าวจำแนกออกเป็นการศึกษาในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ และสัณฐานวิทยาของฟางข้าว การศึกษาปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศด้วยวิธีบีเอ็มพี และการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งมีข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่นำมาใช้หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ช - ๓ และมีรายละเอียดของผลและวิจารณ์ผลการศึกษาดังนี้

#### 4.1 สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว

##### 4.1.1 สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว

สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ ที่ดำเนินการศึกษา ได้แก่ ของแข็งรวม (TS) ของแข็งระเหย (VS) เถ้าหรือของแข็งคงตัว (Ash) อินทรีย์คาร์บอน (OC) ไนโตรเจนรวม (TN) ฟอสฟอรัสรวม (TP) ซีไอดี (COD) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N ratio) ซึ่งมีผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 และมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์ดังนี้

##### 4.1.1.1 ของแข็งรวม

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 จะเห็นว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณของแข็งรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 89.68 – 95.10 เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งรวมในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) พบว่า มีปริมาณที่ใกล้เคียงกันกับการศึกษาของ Darwin, Cheng, Liu, Gontupil, and Kwon (2014) ที่พบว่าฟางข้าวจากข้าวญี่ปุ่น สายพันธุ์ Koshihikari มีปริมาณของแข็งรวมร้อยละ 91.4 แต่มีปริมาณน้อยกว่าการศึกษาของ Gu, Chen, Liu, Zhou, and Zhang (2014) ซึ่งพบว่าฟางข้าวที่เก็บจากเมืองฉงมิง (Chongming) สาธารณรัฐประชาชนจีน มีปริมาณของแข็งรวมร้อยละ 97.3

ตารางที่ 4.1

## สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว

สภาวะการปรับสภาพ	TS (%)	VS (%)	Ash (%)	OC (%)	TN (%)	TP (%)	COD (mg O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> VS)	C : N ratio*
Untreated	92.01 <sup>h</sup> ± 0.05	86.67 <sup>a</sup> ± 0.10	13.33 <sup>k</sup> ± 0.10	54.69 <sup>bcd</sup> ± 0.66	0.5056 <sup>a</sup> ± 0.0127	0.0083 <sup>a</sup> ± 0.0002	1,124 <sup>bcd</sup> ± 13.15	108 : 1
5%-3d	93.74 <sup>d</sup> ± 0.08	84.07 <sup>sh</sup> ± 0.07	15.93 <sup>de</sup> ± 0.07	55.09 <sup>bcd</sup> ± 0.06	0.3418 <sup>c</sup> ± 0.0019	0.0027 <sup>ef</sup> ± 0.0002	1,108 <sup>d</sup> ± 12.86	161 : 1
5%-6d	91.46 <sup>i</sup> ± 0.21	84.53 <sup>f</sup> ± 0.10	15.47 <sup>f</sup> ± 0.10	54.94 <sup>bcd</sup> ± 0.42	0.3325 <sup>cd</sup> ± 0.0034	0.0029 <sup>e</sup> ± 0.0001	1,119 <sup>cd</sup> ± 20.40	165 : 1
5%-12d	93.33 <sup>e</sup> ± 0.20	85.24 <sup>d</sup> ± 0.02	14.76 <sup>h</sup> ± 0.02	55.18 <sup>bcd</sup> ± 0.50	0.2991 <sup>s</sup> ± 0.0035	0.0022 <sup>h</sup> ± 0.0001	1,129 <sup>bcd</sup> ± 9.96	185 : 1
10%-3d	93.05 <sup>f</sup> ± 0.18	83.94 <sup>hi</sup> ± 0.02	16.06 <sup>cd</sup> ± 0.02	54.09 <sup>def</sup> ± 0.59	0.3310 <sup>d</sup> ± 0.0042	0.0036 <sup>d</sup> ± 0.0002	1,136 <sup>bc</sup> ± 6.38	163 : 1
10%-6d	93.16 <sup>f</sup> ± 0.15	84.63 <sup>f</sup> ± 0.08	15.37 <sup>f</sup> ± 0.08	55.30 <sup>bcd</sup> ± 0.76	0.3159 <sup>ef</sup> ± 0.0020	0.0026 <sup>f</sup> ± 0.0001	1,126 <sup>bcd</sup> ± 1.72	175 : 1
10%-12d	92.24 <sup>h</sup> ± 0.07	85.42 <sup>c</sup> ± 0.03	14.58 <sup>i</sup> ± 0.03	54.88 <sup>bcd</sup> ± 0.20	0.2775 <sup>hi</sup> ± 0.0024	0.0022 <sup>gh</sup> ± 0.0002	1,130 <sup>bcd</sup> ± 11.87	198 : 1
15%-3d	93.69 <sup>de</sup> ± 0.32	84.08 <sup>gh</sup> ± 0.11	15.92 <sup>de</sup> ± 0.11	53.71 <sup>def</sup> ± 0.67	0.3082 <sup>fs</sup> ± 0.0121	0.0030 <sup>e</sup> ± 0.0000	1,122 <sup>bcd</sup> ± 4.01	174 : 1
15%-6d	93.02 <sup>f</sup> ± 0.05	85.09 <sup>d</sup> ± 0.05	14.91 <sup>h</sup> ± 0.05	54.53 <sup>bcd</sup> ± 0.40	0.2714 <sup>ij</sup> ± 0.0037	0.0018 <sup>i</sup> ± 0.0001	1,125 <sup>bcd</sup> ± 5.04	201 : 1
15%-12d	91.30 <sup>i</sup> ± 0.19	84.80 <sup>e</sup> ± 0.08	15.20 <sup>g</sup> ± 0.08	52.93 <sup>f</sup> ± 1.03	0.2630 <sup>j</sup> ± 0.0020	0.0022 <sup>h</sup> ± 0.0001	1,126 <sup>bcd</sup> ± 12.71	201 : 1
5%-70C	93.38 <sup>def</sup> ± 0.08	84.69 <sup>ef</sup> ± 0.07	15.31 <sup>g</sup> ± 0.07	55.57 <sup>bc</sup> ± 1.68	0.3196 <sup>e</sup> ± 0.0029	0.0026 <sup>g</sup> ± 0.0002	1,126 <sup>bcd</sup> ± 5.47	174 : 1
5%-80C	93.39 <sup>def</sup> ± 0.06	84.12 <sup>g</sup> ± 0.07	15.88 <sup>e</sup> ± 0.07	53.56 <sup>def</sup> ± 2.51	0.3131 <sup>ef</sup> ± 0.0058	0.0040 <sup>c</sup> ± 0.0003	1,121 <sup>bcd</sup> ± 7.25	171 : 1
5%-90C	89.68 <sup>h</sup> ± 0.08	85.70 <sup>b</sup> ± 0.12	14.30 <sup>j</sup> ± 0.12	54.97 <sup>bcd</sup> ± 1.18	0.2197 <sup>l</sup> ± 0.0049	0.0035 <sup>d</sup> ± 0.0001	1,142 <sup>ab</sup> ± 17.96	250 : 1
10%-70C	92.63 <sup>g</sup> ± 0.27	84.15 <sup>g</sup> ± 0.06	15.85 <sup>e</sup> ± 0.06	53.90 <sup>def</sup> ± 0.44	0.3550 <sup>b</sup> ± 0.0107	0.0034 <sup>d</sup> ± 0.0002	1,131 <sup>bc</sup> ± 10.96	152 : 1
10%-80C	94.52 <sup>bc</sup> ± 0.08	82.57 <sup>k</sup> ± 0.12	17.43 <sup>a</sup> ± 0.12	53.33 <sup>ef</sup> ± 0.29	0.2860 <sup>h</sup> ± 0.0043	0.0047 <sup>b</sup> ± 0.0002	1,115 <sup>cd</sup> ± 7.80	186 : 1
10%-90C	94.22 <sup>c</sup> ± 0.06	84.60 <sup>f</sup> ± 0.13	15.40 <sup>f</sup> ± 0.13	54.85 <sup>bcd</sup> ± 0.43	0.2142 <sup>l</sup> ± 0.0023	0.0028 <sup>ef</sup> ± 0.0002	1,132 <sup>bc</sup> ± 11.52	256 : 1
15%-70C	95.10 <sup>a</sup> ± 0.63	83.38 <sup>j</sup> ± 0.06	16.62 <sup>b</sup> ± 0.06	54.02 <sup>def</sup> ± 0.31	0.3200 <sup>e</sup> ± 0.0032	0.0041 <sup>c</sup> ± 0.0001	1,083 <sup>e</sup> ± 4.42	169 : 1
15%-80C	94.63 <sup>b</sup> ± 0.11	85.47 <sup>c</sup> ± 0.21	14.53 <sup>i</sup> ± 0.21	56.06 <sup>ab</sup> ± 0.76	0.2511 <sup>k</sup> ± 0.0015	0.0033 <sup>d</sup> ± 0.0002	1,160 <sup>a</sup> ± 14.17	223 : 1
15%-90C	94.33 <sup>bc</sup> ± 0.22	83.82 <sup>j</sup> ± 0.13	16.18 <sup>c</sup> ± 0.13	54.86 <sup>bcd</sup> ± 0.66	0.2146 <sup>l</sup> ± 0.0016	0.0029 <sup>e</sup> ± 0.0001	1,143 <sup>ab</sup> ± 11.46	256 : 1

หมายเหตุ 1. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายความว่า ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

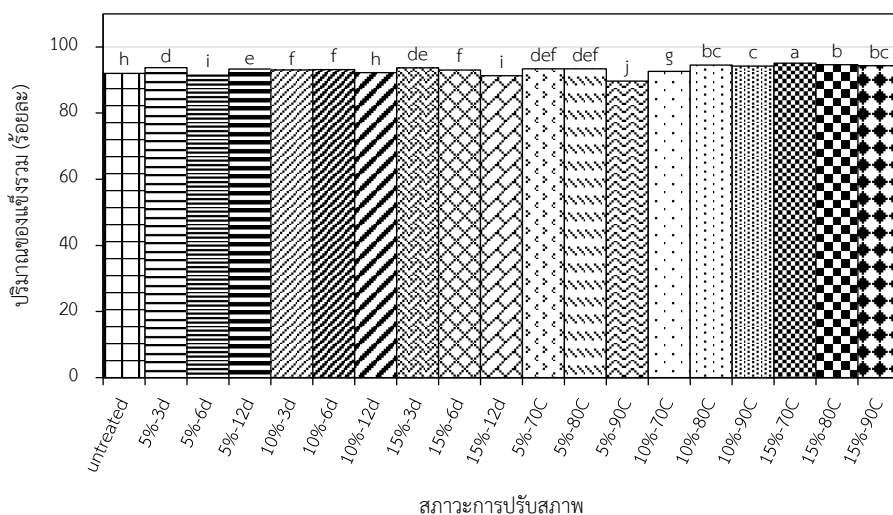
3. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายความว่า ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

4. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่มากกว่า 1 ตัว ในแต่ละคอลัมน์ เช่น bc หมายความว่า ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างจาก b และ c อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

\* หมายถึง ค่าที่ได้จากการคำนวณ ไม่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และไม่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้



เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งรวมในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า ส่วนใหญ่มีปริมาณของแข็งรวมใกล้เคียงหรือมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 92.24 – 95.10 ยกเว้น ตัวอย่าง 5%-6d 15%-12d และ 5%-90C ซึ่งมีปริมาณของแข็งรมน้อยกว่าในตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ คือมีปริมาณของแข็งรวมร้อยละ 91.46 91.30 และ 89.68 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Y. He et al. (2008) ที่ทำการปรับสภาพฟางข้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 6 (โดยน้ำหนัก) ด้วยระดับความชื้นของการปรับสภาพร้อยละ 80 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณของแข็งรวมร้อยละ 91.3 ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพที่มีปริมาณของแข็งรวมร้อยละ 94.0



ภาพที่ 4.1. การเปรียบเทียบปริมาณของแข็งรวมในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ย ปริมาณของแข็งรวมในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 จะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งรวมในหลาย ๆ สภาวะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ .05 โดยปริมาณของแข็งรวมในที่นี้เป็นปริมาณของฟางข้าวที่เหลืออยู่หลังจากระเหยน้ำออกจากฟางข้าวหมดแล้ว ซึ่งปริมาณของแข็งรวมที่แตกต่างกันในฟางข้าวแต่ละสภาวะ อาจเป็นผลมาจาก ฟางข้าวแต่ละสภาวะมีปริมาณความชื้นที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากความชื้นที่มีอยู่ในฟางข้าวเป็นผลรวม

ของความชื้นที่เหลืออยู่ในฟางข้าวหลังจากการเตรียมตัวอย่างรวมกับความชื้นที่ฟางข้าว ดูดซับจากอากาศขณะดำเนินการทดลอง อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งรวมในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะมีปริมาณที่ค่อนข้างสูงมาก คือมีปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 90 ดังนั้นหากมีการนำฟางข้าวนี้ไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจึงมีความจำเป็นต้องเติมน้ำหรือของเหลวอื่นลงไปจนถึงปฏิกิริยา

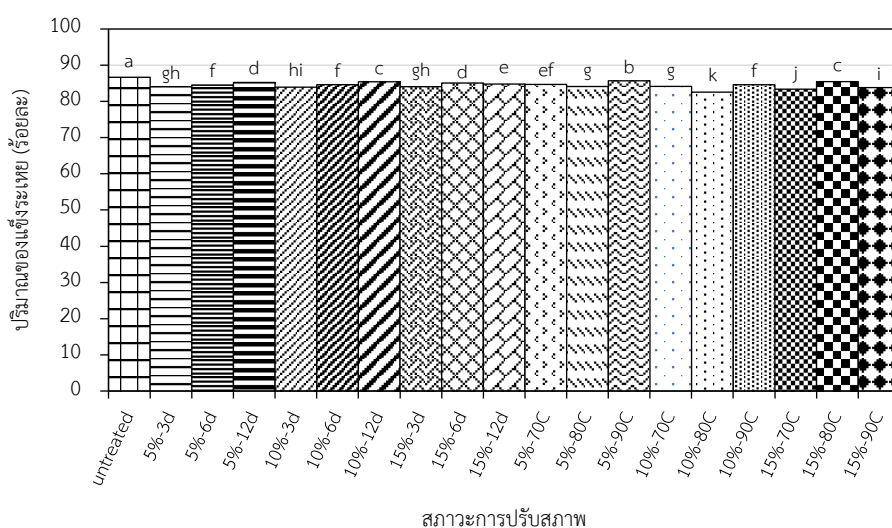
#### 4.1.1.2 ของแข็งระเหย

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยที่แสดงดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 พบว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณของแข็งระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 82.57 – 86.67 และเมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งระเหยของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่ามีปริมาณร้อยละ 86.67 ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Y. He et al. (2008) ที่พบว่าฟางข้าวที่เก็บจากเมืองตง (Tong) สาธารณรัฐประชาชนจีน มีปริมาณของแข็งระเหยร้อยละ 87.2 แต่มีปริมาณมากกว่าการศึกษาของ Gu et al. (2014) และ Song et al. (2013) ที่เก็บตัวอย่างฟางข้าวจากเมืองฉงหมิง (Chongming) และเมืองหยางหลิง (Yangling) ตามลำดับ ในสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีปริมาณของแข็งระเหยร้อยละ 84.0

เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งระเหยของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า มีปริมาณของแข็งระเหยน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 82.57 – 85.70 สอดคล้องกับการศึกษาของ Y. He et al. (2008) ที่พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 6 (โดยน้ำหนัก) ด้วยระดับความชื้นของการปรับสภาพร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ มีปริมาณของแข็งระเหยน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณของแข็งระเหยร้อยละ 87.2 และร้อยละ 79.2 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งระเหยในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 จะเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ มีปริมาณของแข็งระเหยน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ .05 จึงอาจกล่าวได้ว่า การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณของแข็งระเหยของฟางข้าวลดลง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งระเหยในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะก็ยังมีปริมาณที่ค่อนข้างสูง คือ มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าตัวอย่างฟางข้าวที่มีปริมาณของแข็งระเหยสูงจะช่วยส่งเสริมให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Asam et al.,

2011) อย่างไรก็ตามผลผลิตก๊าซชีวภาพอาจไม่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของแข็งระเหยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากของแข็งระเหยประกอบด้วยทั้งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย (คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน) และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) หากของแข็งระเหยประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากเป็นจำนวนมาก จะส่งผลให้มีผลผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากของแข็งระเหยประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายเป็นจำนวนมาก ก็จะส่งผลให้มีผลผลิตก๊าซชีวภาพสูง ด้วยเหตุนี้ปริมาณของแข็งระเหยในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน มากกว่ากัน หรือน้อยกว่ากัน จึงส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพที่แตกต่างกัน และมีผลผลิตก๊าซชีวภาพมากหรือน้อยไม่เท่ากันได้ (Wilkie, 2005)



ภาพที่ 4.2. การเปรียบเทียบปริมาณของแข็งระเหยในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

#### 4.1.1.3 เถ้าหรือของแข็งคงตัว

ปริมาณเถ้าหรือของแข็งคงตัวเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ในฟางข้าว โดยปกติเถ้าของฟางข้าวมักพบธาตุเหล่านี้ในปริมาณมาก เช่น ซิลิกา โพแทสเซียม และแคลเซียม เป็นต้น และพบธาตุเหล่านี้ในปริมาณน้อย เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และโซเดียม เป็นต้น (Jenkins, Baxter, Miles, & Miles, 1998)

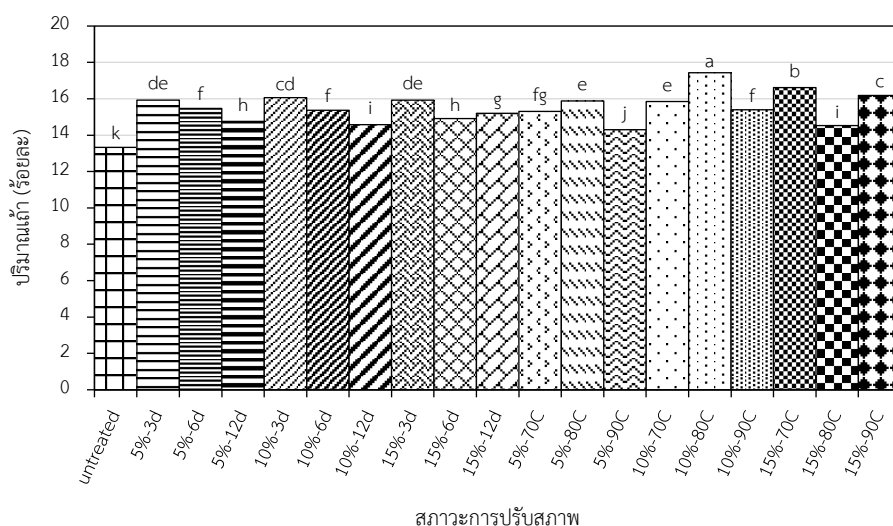
จากผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 13.33 – 17.43 โดยฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) มีปริมาณเถ้าร้อยละ 13.33 ซึ่งเป็นปริมาณที่

ใกล้เคียงกันกับการศึกษาของ Gu et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณเถ้าร้อยละ 13.6 และ การศึกษาของ Y. He et al. (2008) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณเถ้าร้อยละ 12.8 อย่างไรก็ตามพบว่า เถ้าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณน้อยกว่าการศึกษาของ Mohamad Remli, Kalsom Md Shah, Mohamad, and Abd-Aziz (2014) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณเถ้าร้อยละ 14.48

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ (ตารางที่ 4.1) พบว่า มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 14.30 – 17.43 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ สอดคล้องกับการศึกษา ของ Y. He et al. (2008) ที่พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความ เข้มข้นร้อยละ 6 (โดยน้ำหนัก) มีปริมาณเถ้าสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยฟางข้าวที่ ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเถ้าร้อยละ 20.8 และร้อยละ 12.8 ตามลำดับ และสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohamad Remli et al. (2014) ที่พบว่า ฟางข้าวที่ ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มี ปริมาณเถ้าสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น โดยมีปริมาณเถ้าร้อยละ 15.45 ส่วน ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเถ้าร้อยละ 14.48 อย่างไรก็ตาม Mohamad Remli et al. (2014) ก็ยังพบว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีปริมาณเถ้าต่ำกว่าฟางข้าว ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีปริมาณเถ้าร้อยละ 2.85 3.67 และ 10.33 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของ ค่าเฉลี่ยปริมาณเถ้าในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ มี ปริมาณเถ้ามากกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 จึงอาจกล่าว ได้ว่า การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณเถ้าของฟางข้าวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากการตกค้างของแคลเซียมจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพใน ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chang, Burr, and Holtzaple (1997) Chang, Nagwani, and Holtzaple (1998) และ Chang, Nagwani, Kim, and Holtzaple (2001) ที่พบว่า ปริมาณเถ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นในหญ้าสวิตช์ (Switchgrass) ชานอ้อย (Bagasse) และไม้ปอปลาร์ (Poplar wood) ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อ เปรียบเทียบกับหญ้าสวิตช์ ชานอ้อย และไม้ปอปลาร์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ตามลำดับ ซึ่ง Chang et al. (2001) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมในไม้ปอปลาร์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และไม้

ปอปลาร์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผลการวิเคราะห์ พบว่า ไม้ปอปลาร์ที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณแคลเซียมสูงกว่าในไม้ปอปลาร์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นในไม้ปอปลาร์ที่ผ่านการปรับสภาพเป็นผลมาจากการตกค้างของแคลเซียมในไม้ปอปลาร์ระหว่างการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 4.3. การเปรียบเทียบปริมาณเถ้าในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

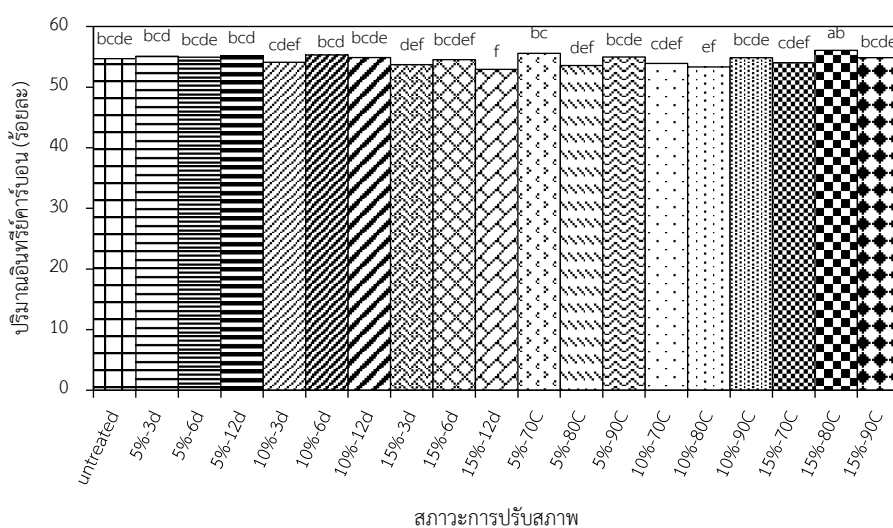
หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

#### 4.1.1.4 อินทรีย์คาร์บอน

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.4 จะเห็นว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 52.93 – 56.06 ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Goyal and Sindhu (2011) ที่พบว่าฟางข้าวที่เก็บจากสถานีวิจัยข้าวระดับภูมิภาค ของมหาวิทยาลัย Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University ในเมืองทิสาร์ ประเทศอินเดีย มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนร้อยละ 51.76 แต่เป็นปริมาณที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Y. He et al. (2008) การศึกษาของ Gu et al. (2014) และการศึกษาของ Song, Yang, Zhang, et al. (2012) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณคาร์บอนรวมร้อยละ 41.5 35.2 และ 33.96 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนรวม คือ ผลรวมของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์คาร์บอนของฟางข้าว ดังนั้นปริมาณคาร์บอนรวมจึงมีปริมาณสูงกว่าอินทรีย์คาร์บอนเสมอ ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ มีปริมาณสูงกว่าปริมาณคาร์บอนรวมของการศึกษา

ต่าง ๆ ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ของการศึกษานี้มีปริมาณสูงกว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฟางข้าวของการศึกษาต่าง ๆ ดังกล่าวเป็นอย่างมาก

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.4 จะเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ใกล้เคียงกัน คือ มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 52.93 – 56.06



ภาพที่ 4.4. การเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของฟางข้าวคิดเป็นร้อยละ 62 – 65 ของปริมาณของแข็งระเหย ซึ่งใกล้เคียงกันกับการศึกษาของ Richard (1996) ที่กล่าวว่า ของแข็งระเหยเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ซึ่งโดยทั่วไปสารอินทรีย์มีองค์ประกอบหลักประกอบด้วย คาร์บอน ออกซิเจน และไนโตรเจน และชีวมวลส่วนใหญ่มักประกอบด้วยอินทรีย์คาร์บอนคิดเป็นร้อยละ 45 – 60 ของปริมาณของแข็งระเหย

#### 4.1.1.5 ไนโตรเจนรวม

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนรวมที่แสดงดังตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณไนโตรเจนรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2142 – 0.5056 และพบว่า

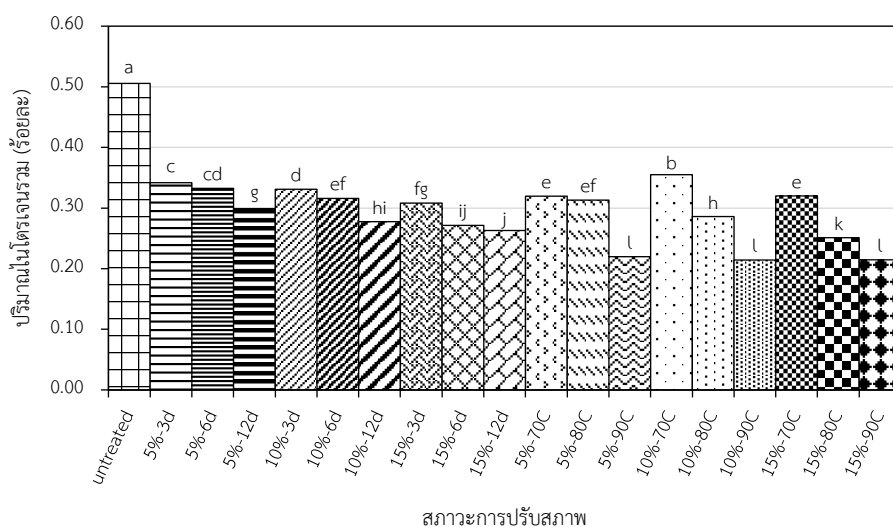
ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) มีปริมาณไนโตรเจนรวมร้อยละ 0.5056 ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Song, Yang, Zhang, et al. (2012) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณไนโตรเจนรวมร้อยละ 0.49 และการศึกษาของ Zou et al. (2016) ที่พบว่าฟางข้าวสาเลียมีปริมาณไนโตรเจนรวมร้อยละ 0.6 แต่มีปริมาณน้อยกว่าการศึกษาของ Y. He et al. (2008) และ Darwin et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณไนโตรเจนรวมร้อยละ 0.71 และร้อยละ 0.8 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนรวมในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จะเห็นว่าไนโตรเจนรวมเป็นปริมาณมากกว่าในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2142 – 0.3550 ต่างจากผลการศึกษาของ Song, Yang, Zhang, et al. (2012) ที่พบว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นมีปริมาณไนโตรเจนรวมน้อยกว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 6, 8 และ 10 โดยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณไนโตรเจนรวมร้อยละ 0.62, 0.86 และ 0.69 ตามลำดับ ส่วนฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณไนโตรเจนรวมร้อยละ 0.49

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนรวมในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.5 จะเห็นว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ มีปริมาณไนโตรเจนรวมน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนรวมของฟางข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาจเป็นผลมาจากการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ทำลายโครงสร้างของลิกนินซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Deublein & Steinhauser, 2011) ทำให้ไนโตรเจนที่อยู่ภายในโครงสร้างของลิกนินดังกล่าวถูกทำลาย และจากภาพที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีระยะเวลาการปรับสภาพนานกว่าจะมีปริมาณไนโตรเจนรวมน้อยกว่า และฟางข้าวที่ผ่านปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพสูงกว่าจะมีปริมาณไนโตรเจนรวมน้อยกว่า จึงสามารถกล่าวได้ว่าระยะเวลาและอุณหภูมิของการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนรวมของฟางข้าวลดลง นอกจากนี้จะเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีระยะเวลาและอุณหภูมิการปรับสภาพเท่ากัน และมีระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า มีปริมาณไนโตรเจนรวมน้อยกว่า จึงสามารถกล่าวได้ว่าระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนรวมของฟางข้าวลดลง

ปริมาณไนโตรเจนรวมในที่นี้เป็นผลรวมของปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน และปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของฟางข้าว โดยการตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนรวมดังกล่าวเป็นสิ่ง

สำคัญมากในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากการประเมินถึงความเพียงพอของไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และสามารถประเมินถึงปริมาณก๊าซแอมโมเนียในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างคร่าว ๆ ได้ คือ ปริมาณร้อยละ 60 – 80 ของปริมาณไนโตรเจนรวมจะถูกย่อยสลายกลายเป็นแอมโมเนียในระหว่างกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทั้งนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้น ซึ่งแอมโมเนียที่เกิดขึ้นอาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้หากมีปริมาณที่สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม (Wellinger, Murphy, & Baxter, 2013) เมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนรวมของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณไนโตรเจนรวมค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น มูลสัตว์ ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนรวมประมาณร้อยละ 0.42 – 6.00 (Dioha, Ikeme, Nafi'u, Soba, & S., 2013) ดังนั้นหากมีการนำฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารอาหารประเภทไนโตรเจนเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ เพื่อป้องกันภาวะขาดไนโตรเจนของจุลินทรีย์ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์อื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ปริมาณซีไออดี ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และปริมาณฟอสฟอรัสรวม เป็นต้น



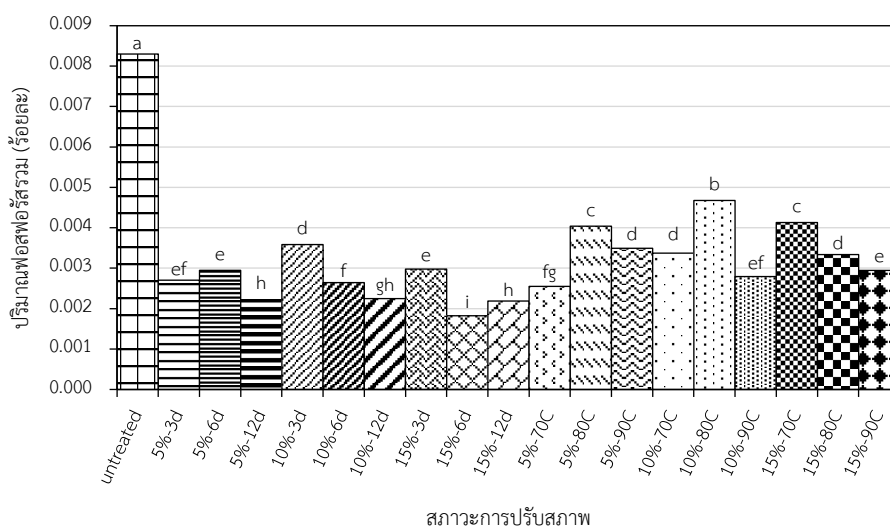
ภาพที่ 4.5. การเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนรวมในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test



#### 4.1.1.6 ฟอสฟอรัสรวม

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสรวมในฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.6 จะเห็นว่าฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณฟอสฟอรัสรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0018 – 0.0083 โดยฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณฟอสฟอรัสรวมมากที่สุดคือ มีปริมาณฟอสฟอรัสรวมร้อยละ 0.0083 ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำกว่าการศึกษาของ Dobermann and Fairhurst (2002) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณฟอสฟอรัสรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.035 – 0.059 และเป็นปริมาณต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Mousavi, Moazzeni, Mostafazadeh-Fard, and Yazdani (2012) ที่พบว่าฟางข้าวจากพื้นที่นาข้าวในจังหวัดกิลาน ประเทศอิหร่าน มีปริมาณฟอสฟอรัสรวมร้อยละ 0.2 และ Goyal and Sindhu (2011) ที่พบว่าฟางข้าวที่เก็บจากสถานีวิจัยข้าวระดับภูมิภาค ของมหาวิทยาลัย Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University ในเมืองฮีซาร์ ประเทศอินเดีย มีปริมาณฟอสฟอรัสรวมร้อยละ 0.20



ภาพที่ 4.6. การเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสรวมในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

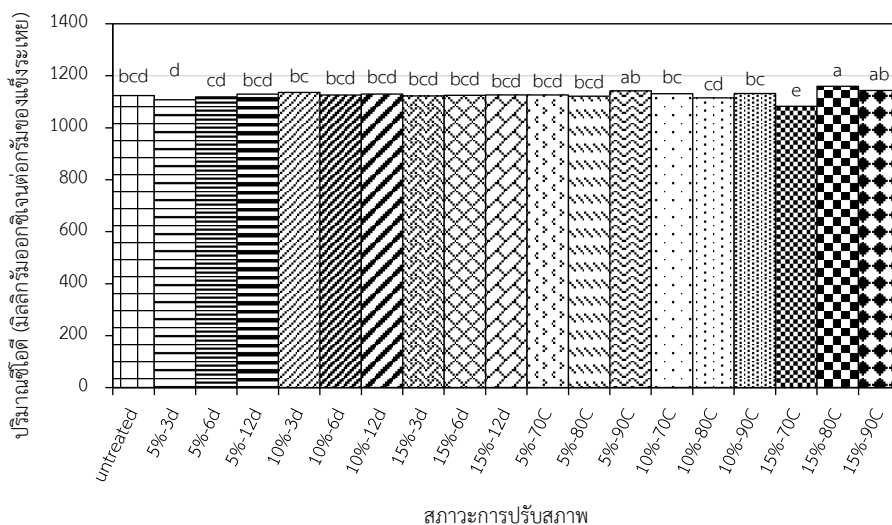
จากภาพที่ 4.6 เมื่อพิจารณาปริมาณฟอสฟอรัสรวมในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่า มีปริมาณฟอสฟอรัสรวมน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ คือ มีปริมาณฟอสฟอรัสรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0018 – 0.0047 ส่วนฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณฟอสฟอรัสรวมร้อยละ 0.0083 และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสรวม ดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.6

จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสรวมของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สภาวะต่าง ๆ มีค่าน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ซึ่ง อาจเป็นผลมาจากการล้างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากฟางข้าวหลังจากปรับสภาพฟางข้าว ส่งผล ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสรวมของฟางข้าวลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Chang et al. (2001) ที่ ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในไม้ปอปลาร์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ไม้ปอปลาร์ที่ผ่านการล้าง ด้วยน้ำ และไม้ปอปลาร์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผลการวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสในไม้ปอปลาร์ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อ เปรียบเทียบกับในไม้ปอปลาร์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ละลายได้ ง่ายมาก แม้วายังไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์

#### 4.1.1.7 ซีโอดี

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.7 จะเห็นว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มี ปริมาณซีโอดีใกล้เคียงกัน คือ มีปริมาณอยู่ในช่วง 1,083 – 1,160 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อกรัม ของแห้งระเหย ซึ่งเป็นปริมาณใกล้เคียงกับการศึกษาของ Paepatung, Nopharatana, and Songkasiri (2009) ที่พบว่าฟางข้าวมีปริมาณซีโอดี 1,067 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อกรัมของแห้งระเหย เมื่อพิจารณาผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดีในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะ ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.7 จะเห็นว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณซีโอดีที่สภาวะต่าง ๆ ส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ยกเว้นในตัวอย่าง 15%-70C ที่ แม้วามีปริมาณซีโอดีน้อยที่สุด (1,083 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อกรัมของแห้งระเหย) แต่ก็มีค่าซีโอดีต่ำ กว่าค่าสูงสุดเพียงแค่อ้อยละ 6.6 เท่านั้น

นอกจากนี้ปริมาณซีโอดีเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งที่ ย่อยสลายได้ง่ายและย่อยสลายได้ยากที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้โดยสารเคมี ซึ่งแสดงถึงปริมาณ สารอินทรีย์สูงสุดของวัสดุตั้งต้นที่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ ทำให้สามารถประเมินถึงปริมาณ ก๊าซชีวภาพสูงสุดที่สามารถผลิตได้จากวัสดุตั้งต้น (Wellinger et al., 2013) แต่อย่างไรก็ตามฟางข้าว จัดเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ ย่อยสลายได้ยากโดยจุลินทรีย์ ดังนั้นก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงอาจมีปริมาณต่ำกว่าค่าที่คาดการณ์ได้จาก ปริมาณซีโอดี



ภาพที่ 4.7. การเปรียบเทียบปริมาณซีโอทีในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

#### 4.1.1.8 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

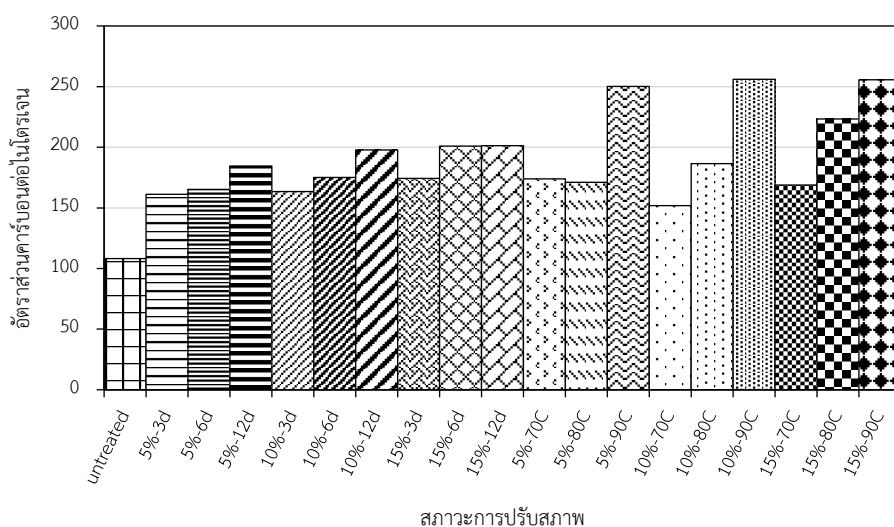
จากผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนรวมของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ สามารถคำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (โดยน้ำหนักแห้ง) ได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 108 : 1 และเป็นอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่น ๆ ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 51 : 1 – 131 : 1

โดยฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 108 : 1 ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับการศึกษาของ เกษมศรี ชับซ้อน (2541) และการศึกษาของพันธ์ทิพย์ กลุ่มแจ็ก และปฐมพร น้อยจันทร์ (2561) ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.2 ส่วนฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 161 : 1 – 256 : 1 (ตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.8) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่สูงกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเนื่องจากปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณไนโตรเจนรวมลดลงถึงร้อยละ 30 – 58 เมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ส่งผลให้ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้น

## ตารางที่ 4.2

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (โดยน้ำหนักแห้ง)	เอกสารอ้างอิง
51 : 1	Darwin et al. (2014)
52 : 1	Y. He et al. (2008)
60 : 1	Zou et al. (2016)
69 : 1	Song et al. (2013)
80 : 1	Goyal and Sindhu (2011)
86 : 1	Mohanty (2015)
90 : 1	A. Sharma et al. (2014)
80 : 1 – 120 : 1	เกษมศรี ชับซ้อน (2541)
131 : 1	พันธ์ทิพย์ กล่อมแจ็ก และปฐมพร น้อยจันทร์ (2561)
108 : 1	การศึกษานี้



ภาพที่ 4.8. การเปรียบเทียบอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในตัวอย่างฟางข้าวแต่ละสภาวะ.

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 16 : 1 – 25 : 1 (Deublein & Steinhauser, 2011) จะเห็นว่า ฟางข้าว

ที่สภาวะต่าง ๆ มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม สำหรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงเกินไปในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นหมายถึงการขาดไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างโปรตีนของเซลล์จุลินทรีย์ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังนั้นหากต้องการนำฟางข้าวดังกล่าวไปเป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารอาหารไนโตรเจนในสัดส่วนที่เหมาะสม

สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินลักษณะเบื้องต้นของฟางข้าว เพื่อนำฟางข้าวไปใช้ประโยชน์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพรูปแบบต่าง ๆ สำหรับในขั้นนี้ได้ยกตัวอย่างเฉพาะการนำฟางข้าวไปใช้เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยปริมาณของแข็งรวมสามารถนำไปใช้ในการประเมินขนาดของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ถ้าเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณของแข็งระเหย อินทรีย์คาร์บอน และซีไอดี เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปแบบต่าง ๆ และไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวม เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอาหาร ทั้งนี้ปริมาณสารอินทรีย์และปริมาณสารอาหารเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องพิจารณาร่วมกันในลักษณะของอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนให้เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งอัตราส่วนที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราส่วนคาร์บอน : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส และ/หรือ อัตราส่วน ซีไอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส โดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 500 – 1000 : 15 – 20 : 5 และ 100 : 5 : 1 ตามลำดับ (Deublein & Steinhauser, 2011; Eskicioglu & Ghorbani, 2011) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่พบว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีอัตราส่วน คาร์บอน : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส (โดยน้ำหนักแห้ง) และอัตราส่วนซีไอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส (โดยน้ำหนักแห้ง) คือ 1000 : 4 – 9 : 0 และ 100 : 0.3 : 0 แสดงให้เห็นว่าหากนำฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้เพียงพอและเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

เมื่อพิจารณาถึงผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพต่อสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว อาจกล่าวได้ว่า การปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลกระทบต่อปริมาณของแข็งรวม และปริมาณซีไอดี แต่มีผลกระทบต่อปริมาณของแข็งระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวม และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว

องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าวที่ดำเนินการศึกษา ได้แก่ สารแทรก (Extractives, EXT) เซลลูโลส (Cellulose, CEL) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose, HEM) ลิกนินที่ไม่

ละลายในกรด (Acid insoluble lignin, AISL) ลิกนินที่ละลายในกรด (Acid soluble lignin, ASL) และลิกนิน (LIG) โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3 และมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ในแต่ละองค์ประกอบดังนี้

#### 4.1.2.1 สารแทรก

โดยทั่วไปสารแทรกมักประกอบด้วย ไขมัน (Lipids) กรดไขมัน (Fatty acids) และไข (Waxes) ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วยน้ำและสารละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เอทานอล (Ethanol) อะซีโตน (Acetone) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) หรือสารผสมของเอทานอลกับเบนซีน เป็นต้น (Y. He et al., 2009) ในการศึกษานี้ได้ทำการสกัดสารแทรกด้วยอะซีโตน และมีผลการวิเคราะห์ปริมาณสารแทรกแสดงดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.9 โดยพบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีปริมาณสารแทรกร้อยละ 1.21 และเป็นปริมาณมากกว่าหรือใกล้เคียงกับฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ยกเว้นฟางข้าวที่สภาวะ 10%-80C มีปริมาณสารแทรกร้อยละ 1.66 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้ยังตรวจไม่พบสารแทรกในฟางข้าวที่สภาวะ 15%-70C และ 15%-80C

เมื่อพิจารณาปริมาณสารแทรกในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพของการศึกษานี้ พบว่า มีปริมาณน้อยกว่าการศึกษาของ L. Lin, Yan, Liu, and Jiang (2010) ที่ทำการสกัดสารแทรกในฟางข้าวโดยใช้อะซีโตนเช่นเดียวกัน โดยในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณสารแทรกถึงร้อยละ 7.0 และเมื่อพิจารณาปริมาณสารแทรกในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ของการศึกษานี้ พบว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ส่วนใหญ่มีปริมาณสารแทรกน้อยกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ L. Lin et al. (2010) ที่พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ร้อยละ 2 ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร มีปริมาณสารแทรกร้อยละ 3.3 ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ร้อยละ 7.0)

เมื่อพิจารณาปริมาณสารแทรกในฟางข้าวที่สกัดด้วยสารผสมของเอทานอลกับเบนซีน ในการศึกษาของ Y. He et al. (2008) และ Y. Zhang, Chen, Gu, and Zhou (2015) พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณสารแทรกร้อยละ 10.4 และร้อยละ 7.1 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณสารแทรกร้อยละ 5.1 และร้อยละ 3.5 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาปริมาณสารแทรกของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ของการศึกษานี้ จะเห็นว่า ปริมาณสารแทรกมีความแปรผันค่อนข้างสูง ซึ่งเห็นได้จากผลการทดสอบ

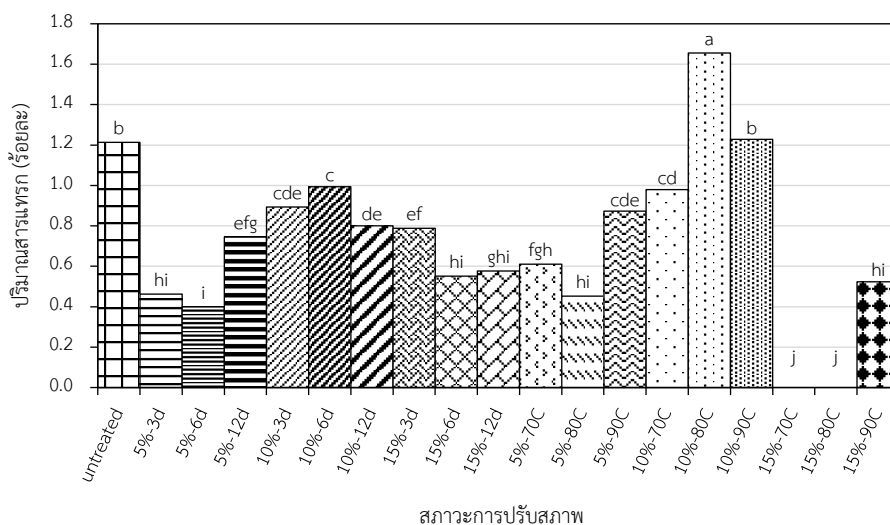
ความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ย ซึ่งส่วนใหญ่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และยังมีความแตกต่างกับผลการศึกษาของงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมา ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจาก การใช้ตัวทำละลายในการสกัดสารแทรกแตกต่างกัน หรือใช้สภาวะในการสกัดที่แตกต่างกันแม้ว่าจะใช้ตัวทำละลายชนิดเดียวกัน หรืออาจขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของชีวมวล วิธีการเพาะปลูก และระยะเวลาการเก็บเกี่ยว ซึ่งส่งผลให้ปริมาณสารแทรกในชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

#### ตารางที่ 4.3

##### องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว

สภาวะการปรับสภาพ	%EXT	%CEL*	%HEM	%AISL	%ASL	%LIG
Untreated	1.21 <sup>b</sup> ± 0.11	25.15	47.79 <sup>a</sup> ± 0.55	12.47 <sup>a</sup> ± 0.15	0.0454 <sup>a</sup> ± 0.0015	12.51 <sup>a</sup> ± 0.15
5%-3d	0.46 <sup>hi</sup> ± 0.03	39.94	34.89 <sup>b</sup> ± 0.13	8.75 <sup>de</sup> ± 0.04	0.0356 <sup>efg</sup> ± 0.0010	8.78 <sup>de</sup> ± 0.04
5%-6d	0.40 <sup>i</sup> ± 0.09	41.85	33.72 <sup>b</sup> ± 0.80	8.52 <sup>ef</sup> ± 0.04	0.0352 <sup>fgh</sup> ± 0.0016	8.55 <sup>def</sup> ± 0.04
5%-12d	0.75 <sup>efg</sup> ± 0.01	44.73	31.81 <sup>c</sup> ± 0.21	7.91 <sup>g</sup> ± 0.04	0.0379 <sup>cde</sup> ± 0.0004	7.95 <sup>g</sup> ± 0.04
10%-3d	0.89 <sup>cde</sup> ± 0.11	40.81	33.86 <sup>b</sup> ± 0.51	8.34 <sup>f</sup> ± 0.09	0.0399 <sup>c</sup> ± 0.0005	8.38 <sup>f</sup> ± 0.09
10%-6d	0.99 <sup>c</sup> ± 0.01	43.47	31.94 <sup>c</sup> ± 0.71	8.18 <sup>fg</sup> ± 0.16	0.0423 <sup>b</sup> ± 0.0009	8.22 <sup>fg</sup> ± 0.16
10%-12d	0.80 <sup>de</sup> ± 0.16	44.55	32.05 <sup>c</sup> ± 1.57	7.98 <sup>g</sup> ± 0.16	0.0402 <sup>c</sup> ± 0.0007	8.02 <sup>g</sup> ± 0.16
15%-3d	0.79 <sup>ef</sup> ± 0.10	40.03	34.51 <sup>b</sup> ± 1.30	8.71 <sup>de</sup> ± 0.12	0.0351 <sup>fgh</sup> ± 0.0011	8.74 <sup>de</sup> ± 0.11
15%-6d	0.55 <sup>hi</sup> ± 0.14	42.23	33.86 <sup>b</sup> ± 0.56	8.41 <sup>ef</sup> ± 0.38	0.0364 <sup>def</sup> ± 0.0011	8.44 <sup>ef</sup> ± 0.38
15%-12d	0.58 <sup>ghi</sup> ± 0.04	43.84	32.17 <sup>c</sup> ± 0.94	8.19 <sup>fg</sup> ± 0.05	0.0344 <sup>fgh</sup> ± 0.0007	8.22 <sup>fg</sup> ± 0.05
5%-70C	0.61 <sup>fgh</sup> ± 0.14	39.74	34.89 <sup>b</sup> ± 0.37	9.42 ± 0.17	0.0364 <sup>def</sup> ± 0.0005	9.46 <sup>c</sup> ± 0.17
5%-80C	0.45 <sup>hi</sup> ± 0.11	40.67	33.56 <sup>b</sup> ± 0.30	9.40 <sup>c</sup> ± 0.35	0.0331 <sup>hi</sup> ± 0.0013	9.43 <sup>c</sup> ± 0.35
5%-90C	0.87 <sup>cde</sup> ± 0.09	45.80	29.50 <sup>d</sup> ± 0.19	9.50 <sup>bc</sup> ± 0.13	0.0307 <sup>i</sup> ± 0.0017	9.53 <sup>c</sup> ± 0.13
10%-70C	0.98 <sup>cd</sup> ± 0.04	39.07	34.48 <sup>b</sup> ± 0.12	9.59 <sup>bc</sup> ± 0.12	0.0332 <sup>gh</sup> ± 0.0002	9.62 <sup>bc</sup> ± 0.12
10%-80C	1.66 <sup>a</sup> ± 0.02	39.90	32.18 <sup>c</sup> ± 0.16	8.79 <sup>d</sup> ± 0.14	0.0386 <sup>c</sup> ± 0.0031	8.83 <sup>d</sup> ± 0.14
10%-90C	1.23 <sup>b</sup> ± 0.16	44.00	29.95 <sup>d</sup> ± 0.42	9.39 <sup>c</sup> ± 0.15	0.0343 <sup>fgh</sup> ± 0.0001	9.43 <sup>c</sup> ± 0.15
15%-70C	0.00 <sup>j</sup> ± 0.00	39.15	34.50 <sup>b</sup> ± 1.18	9.90 <sup>b</sup> ± 0.22	0.0380 <sup>cde</sup> ± 0.0011	9.93 <sup>b</sup> ± 0.22
15%-80C	0.00 <sup>j</sup> ± 0.00	44.52	32.12 <sup>c</sup> ± 0.53	9.61 <sup>bc</sup> ± 0.10	0.0390 <sup>cd</sup> ± 0.0012	9.65 <sup>bc</sup> ± 0.10
15%-90C	0.52 <sup>hi</sup> ± 0.10	44.78	29.16 <sup>d</sup> ± 0.11	9.32 <sup>c</sup> ± 0.41	0.0381 <sup>cd</sup> ± 0.0028	9.35 <sup>c</sup> ± 0.41

- หมายเหตุ. 1. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 2. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายความว่า ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test  
 3. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายความว่า ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test  
 4. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่มากกว่า 1 ตัว ในแต่ละคอลัมน์ เช่น bc หมายความว่า ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างจาก b และ c อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test  
 \* หมายถึง ค่าที่ได้จากการคำนวณ ไม่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และไม่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้



ภาพที่ 4.9. การเปรียบเทียบปริมาณสารแทรกในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

#### 4.1.2.2 เซลลูโลส

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 25.15 – 45.80 และพบว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 25.15 ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าการศึกษาของ L. Lin et al. (2010) แต่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่น ๆ ตามที่ระบุดังตารางที่ 4.4

เมื่อพิจารณาปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.10) จะเห็นว่าปริมาณเซลลูโลสสูงกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 39.15 – 45.80 ซึ่งปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 55.67 – 82.11 ของปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณเซลลูโลสของฟางข้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohamad Remli et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 70.93 66.22 56.60 และ 52.97 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพที่มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 37.82 การที่ฟางข้าวภายหลังการ



ปรับสภาพมีสัดส่วนของเซลลูโลสที่เพิ่มสูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากสภาวะความเป็นด่างที่เกิดจากการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (พีเอช 12) ได้ทำลายพันธะเอสเทอร์ (Ester bonds) ที่เชื่อมระหว่างลิกนินกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสส่งผลให้เซลลูโลสแยกออกจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้น (Nathalie, François, & Bernard, 2003)

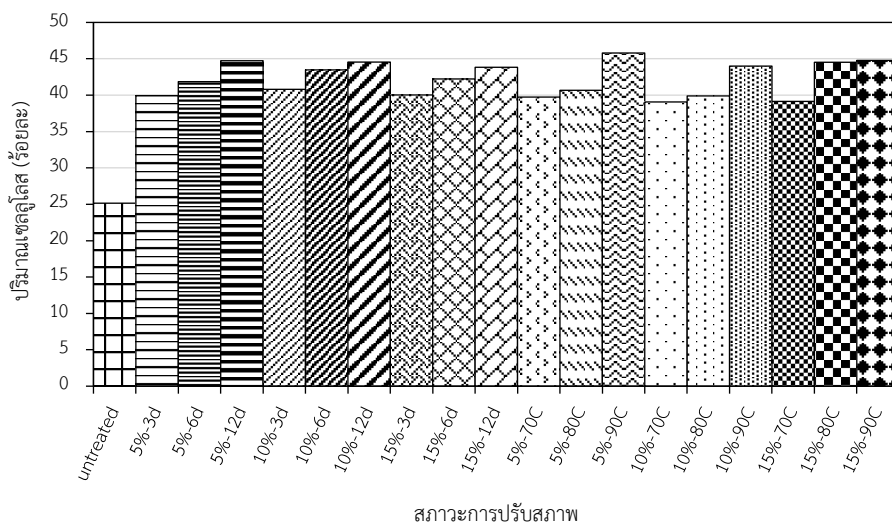
#### ตารางที่ 4.4

##### ปริมาณเซลลูโลสในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุลิกโนเซลลูโลส	ปริมาณเซลลูโลส (ร้อยละ)	เอกสารอ้างอิง
ฟางข้าว	19.8	L. Lin et al. (2010)
ฟางข้าว	30.0	Y. Zhang et al. (2015)
ฟางข้าว	30.5	F.-h. Li, Hu, Yao, Wang, and Li (2012)
ฟางข้าว	33.4	Y. He et al. (2008)
ฟางข้าว	37.82	Mohamad Remli et al. (2014)
ฟางข้าว	45.36	Song et al. (2013))
ฟางข้าวโพด	49.3	Song et al. (2014)
ชานอ้อย	35.28	Ayeni, Adeeyo, Oresgun, and Oladimeji (2015)
สาบเสื่อ	40.2	Ayeni et al. (2015)
ขี้เสื่อจากต้นซี	45.9	Ayeni et al. (2015)
ฟางข้าว	25.15	การศึกษานี้

นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีระยะเวลาการปรับสภาพนานกว่าจะมีปริมาณเซลลูโลสมากกว่า และฟางข้าวที่ผ่านปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพสูงกว่าจะมีปริมาณเซลลูโลสมากกว่า จึงสามารถกล่าวได้ว่าระยะเวลาและอุณหภูมิของการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณเซลลูโลสของฟางข้าวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระยะเวลาการปรับสภาพที่นานขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายโครงสร้างของลิกนิน (Song et al., 2013) และอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อการละลายของเฮมิเซลลูโลสและการ

ทำลายโครงสร้างของลิกนิน ทำให้เซลลูโลสแยกออกจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้น (Blom et al., 2012)



ภาพที่ 4.10. การเปรียบเทียบปริมาณเซลลูโลสในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ.

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่ระยะเวลาการปรับสภาพเท่ากัน หรือที่ระดับอุณหภูมิของการปรับสภาพเดียวกัน มีปริมาณเซลลูโลสใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Song et al. (2014) ที่ได้ทำการปรับสภาพฟางข้าวโพดด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 4 6 8 และ 12 พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลสไม่แตกต่างกัน คือ มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 47.5 46.1 46.3 และ 48.0 ตามลำดับ แต่ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Song et al. (2013) ที่ได้ทำการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 4 8 และ 12 ที่พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น มีปริมาณเซลลูโลสลดลง ทั้งนี้ความไม่สอดคล้องกันของผลการศึกษาดังกล่าว อาจมีสาเหตุมาจากชนิด และสภาวะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันของวัสดุลิกนินเซลลูโลส (Song et al., 2013)

#### 4.1.2.3 เฮมิเซลลูโลส

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่แสดงดังตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 29.16 – 47.79 เมื่อพิจารณาปริมาณ

เฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่ามีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 47.79 ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าการศึกษาอื่น ๆ ตามที่ระบุดังตารางที่ 4.5

เมื่อพิจารณาปริมาณเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.11) จะเห็นว่ามีปริมาณเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 29.16 – 34.89 ซึ่งปริมาณที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 26.99 – 38.98 ของปริมาณเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสของฟางข้าวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohamad Remli et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 7.24 ซึ่งน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 24.22

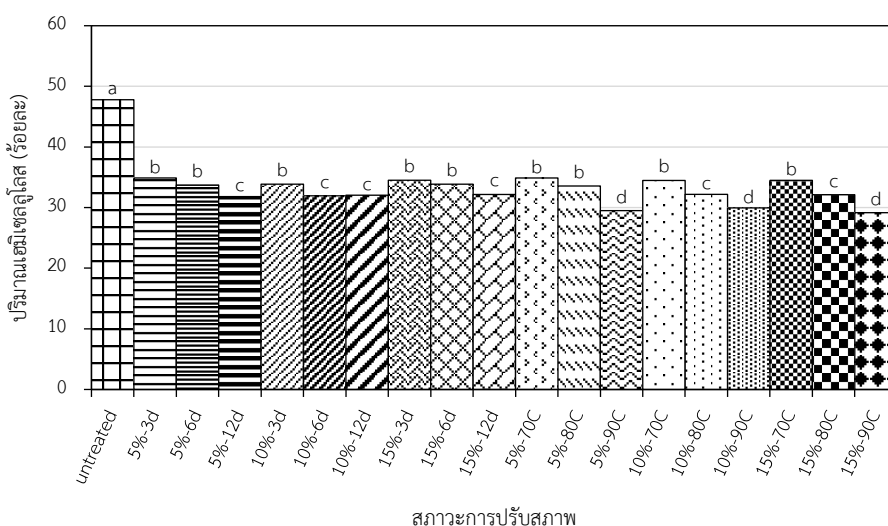
#### ตารางที่ 4.5

##### ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุลิกโนเซลลูโลส	ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)	เอกสารอ้างอิง
ฟางข้าว	21.1	F.-h. Li et al. (2012)
ฟางข้าว	24.22	Mohamad Remli et al. (2014)
ฟางข้าว	28.14	Song et al. (2013)
ฟางข้าว	28.2	Y. He et al. (2008)
ฟางข้าว	29.8	Y. Zhang et al. (2015)
ฟางข้าว	43.9	L. Lin et al. (2010)
ฟางข้าวโพด	28.8	Song et al. (2014)
ชานอ้อย	33.28	Ayeni et al. (2015)
สาบเสือ	29.9	Ayeni et al. (2015)
ขี้เลื่อยจากต้นซี	20.3	Ayeni et al. (2015)
ฟางข้าว	47.79	การศึกษานี้

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณเฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.11 จะเห็นว่าในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ มี

ปริมาณเอมิเซลลูโลสน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณเอมิเซลลูโลสของฟางข้าวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mohamad Remli et al. (2014) Song, Yang, Zhang, et al. (2012) และ Song et al. (2013) ที่พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณเอมิเซลลูโลสน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ รวมถึงสอดคล้องกับการศึกษาของ Song et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวโพดที่ผ่านการปรับด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณเอมิเซลลูโลสน้อยกว่าฟางข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้ก็ยิ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ L. Lin et al. (2010) Mohamad Remli et al. (2014) และ Y. Zhang et al. (2015) ที่พบว่าวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพด้วยต่างชนิดอื่น ๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ มีปริมาณเอมิเซลลูโลสน้อยกว่าวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



ภาพที่ 4.11. การเปรียบเทียบปริมาณเอมิเซลลูโลสในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีระยะเวลาการปรับสภาพนานกว่าจะมีปริมาณเอมิเซลลูโลสน้อยกว่า และฟางข้าวที่ผ่านปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพสูงกว่าจะมีปริมาณเอมิเซลลูโลสน้อยกว่า จึงสามารถกล่าวได้ว่าระยะเวลาและอุณหภูมิของการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณเอมิเซลลูโลสของฟางข้าวลดลง ทั้งนี้การ

ลดลงของเฮมิเซลลูโลสที่เกิดจากการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อาจมีสาเหตุมาจากสภาวะความเป็นด่างที่เกิดขึ้นจากการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (พีเอช 12) ได้ทำลายพันธะเอสเทอร์ที่เชื่อมระหว่างลิกนินกับเฮมิเซลลูโลสส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสแยกออกจากลิกนินได้มากขึ้น (Nathalie et al., 2003) และทำให้เฮมิเซลลูโลสเกิดการไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) และอาจเกิดการสลายตัวกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้เมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพนานขึ้นและอุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้เฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงได้ในที่สุด (Gerhardt, 1929; Song et al., 2013)

#### 4.1.2.4 ลิกนิน

ปริมาณลิกนินในที่นี้เป็นผลรวมของลิกนินที่ไม่ละลายในกรด และลิกนินที่ละลายในกรด และจากผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า ฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณลิกนินอยู่ในช่วงร้อยละ 7.95 – 12.51 ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของลิกนินเป็นลิกนินที่ไม่ละลายในกรด โดยมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 7.91 – 12.47 สำหรับส่วนที่เหลือเป็นลิกนินที่ละลายในกรด ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0307 – 0.0454

เมื่อพิจารณาปริมาณลิกนินของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จะเห็นว่ามีปริมาณลิกนินร้อยละ 12.51 ซึ่งเป็นปริมาณที่มากกว่าบางการศึกษา และน้อยกว่าบางการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6

ปริมาณลิกนินในวัสดุลิกโนเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ

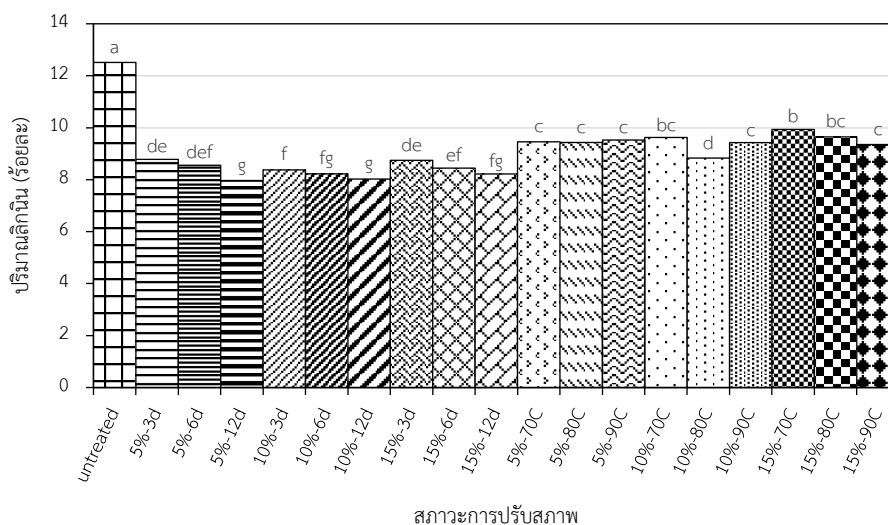
ชนิดของวัสดุลิกโนเซลลูโลส	ปริมาณลิกนิน (ร้อยละ)	เอกสารอ้างอิง
ฟางข้าว	6.5	Y. Zhang et al. (2015)
ฟางข้าว	6.88	Song et al. (2013)
ฟางข้าว	7.1	Y. He et al. (2008)
ฟางข้าว	12.72	Mohamad Remli et al. (2014)
ฟางข้าว	19.7	F.-h. Li et al. (2012)
ฟางข้าว	29.3	L. Lin et al. (2010)
ฟางข้าวโพด	7.5	Song et al. (2014)
ชานอ้อย	25.20	Ayeni et al. (2015)
سابเสื่อ	23.2	Ayeni et al. (2015)
ขี้เลื่อยจากต้นซี	29.9	Ayeni et al. (2015)
ฟางข้าว	12.51	การศึกษานี้

เมื่อพิจารณาปริมาณลิกนินในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.12) จะเห็นว่าปริมาณลิกนิน น้อยกว่าในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีปริมาณลิกนินอยู่ในช่วงร้อยละ 7.95 – 9.93 ซึ่งปริมาณที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 20.62 – 36.45 ของปริมาณลิกนินในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณลิกนินของฟางข้าวลดลง

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณลิกนินในตัวอย่างฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.12 จะเห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 18 สภาวะ มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณลิกนินของฟางข้าวลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Song, Yang, Guo, et al. (2012) Song et al. (2013) และ Mohamad Remli et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณลิกนินลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ รวมถึงสอดคล้องกับการศึกษาของ Song et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าฟางข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ L. Lin et al. (2010) Y. Zhang et al. (2015) และ Mohamad Remli et al. (2014) ที่พบว่าวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพด้วยต่างชนิดอื่น ๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าสภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีระยะเวลาการปรับสภาพนานกว่าจะมีปริมาณลิกนินน้อยกว่า และฟางข้าวที่ผ่านปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพสูงกว่าจะมีปริมาณลิกนินน้อยกว่า จึงมีความเป็นไปได้ว่าระยะเวลาและอุณหภูมิของการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณลิกนินของฟางข้าวลดลง

ทั้งนี้การลดลงของลิกนินจากการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อาจเป็นผลมาจากสภาวะความเป็นด่างที่เกิดจากการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (พีเอช 12) ได้ทำลายพันธะเอสเทอร์ (Ester bonds) ที่เชื่อมระหว่างลิกนินกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสส่งผลให้โครงสร้างของลิกนินเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยลง (Nathalie et al., 2003) และบางส่วนอาจเกิดการสลายตัวกลายเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids) (Harmsen et al., 2010; Panagiotou & Olsson, 2007)



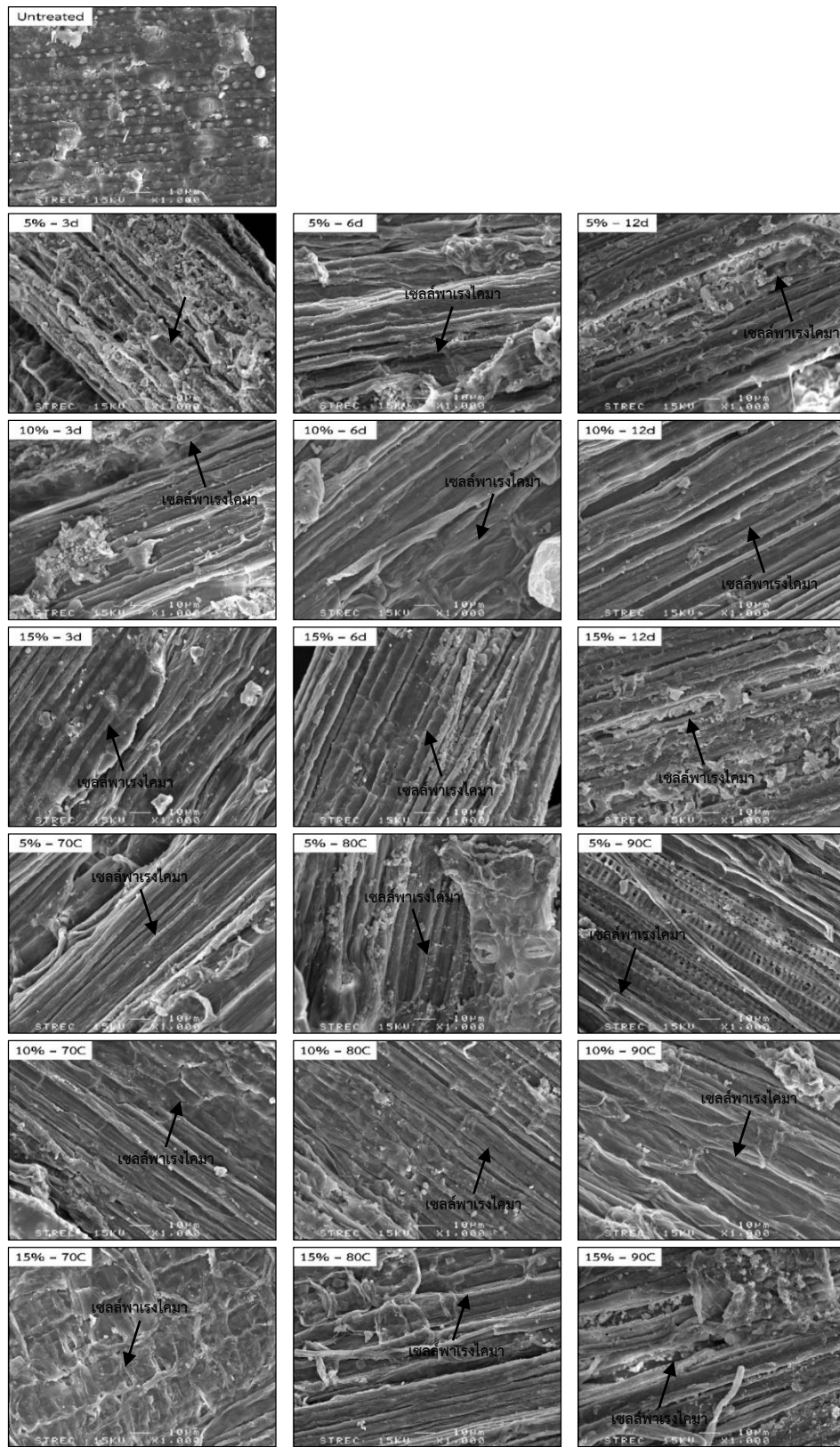
ภาพที่ 4.12. การเปรียบเทียบปริมาณลิกนินในตัวอย่างฟางข้าวของแต่ละสภาวะ.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

เมื่อพิจารณาถึงผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพต่อองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว อาจกล่าวได้ว่า การปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อการลดลงของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของเซลลูโลส อย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.1.3 สัณฐานวิทยาของฟางข้าว

สัณฐานวิทยาของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM - 6400 ของบริษัท JEOL ที่ค่าอัตราเร่งความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 1000 เท่า มีโครงสร้างและพื้นผิวแสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13. ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ.



จากภาพที่ 4.13 จะเห็นว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีโครงสร้างของมัดเส้นใยที่ยึดติดกันอย่างแข็งแรง และมีลักษณะพื้นผิวภายนอก (Epidermal surface) เป็นปุ่ม ขรุขระ และสังเกตเห็นชั้นของสิ่งเจือปนเคลือบอยู่บนพื้นผิว ซึ่งอาจเป็นซิลิกา น้ำมัน ไข และสารแทรก ทั้งนี้ Vilay, Mariatti, Mat Taib, and Todo (2008) และ Carvalho, Mulinari, Voorwald, and Cioffi (2010) ได้ตรวจพบน้ำมัน ไข และสารแทรกอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าว และเส้นใยของชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และสารเหล่านี้มักเป็นสารที่พบเป็นองค์ประกอบตามปกติในวัสดุเซลลูโลส นอกจากนี้ซิลิกาในฟางข้าวยังเป็นส่วนที่กีดขวางการเข้าถึงโครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้ฟางข้าวมีประสิทธิภาพการย่อยสลายต่ำ (Kaur & Phutela, 2016)

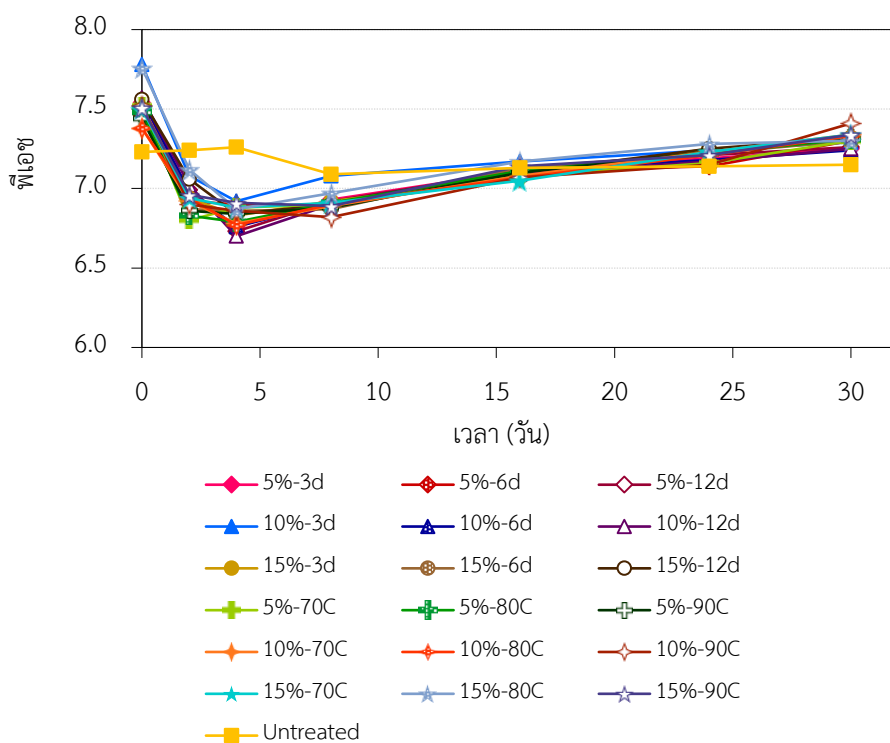
เมื่อเปรียบเทียบฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพกับฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ จะเห็นว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะพื้นผิวที่สะอาดและปราศจากพื้นผิวภายนอก (Epidermal surface) ซึ่งอาจประกอบด้วยชั้นของน้ำมัน ไข และสารแทรก และมีลักษณะของพื้นผิวที่แตกต่างไปจากพื้นผิวของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างชัดเจน สังเกตเห็นลักษณะมัดของเส้นใยเซลลูโลสที่ชัดเจนขึ้น และมีรูพรุนมากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาของ Le Troedec et al. (2008) และ Kaur and Phutela (2016) พบว่า การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมีสามารถกำจัดสารแทรก น้ำมัน ไข และส่วนที่มีความเป็นผลึกต่ำ เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รวมถึงซิลิกา ออกจากพื้นผิวของวัสดุเซลลูโลสได้ จึงส่งผลให้มีความขรุขระบนพื้นผิวของเส้นใยมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อสารเหล่านี้ถูกกำจัดออกไป จะทำให้สังเกตเห็นเซลล์พาราเอนไคมา (Parenchyma cells) ซึ่งเป็นเซลล์ที่เป็นองค์ประกอบตามธรรมชาติของวัสดุเซลลูโลสได้ชัดเจนมากขึ้น (Rout, Misra, Tripathy, Nayak, & Mohanty, 2001)

#### 4.2 ปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว

ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยวิธีบีเอ็มพี ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 30 วัน ได้มีการนำของผสมภายในขวดหมักมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญบางประการซึ่งสามารถนำมาใช้ในการบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช ความเป็นด่าง กรดไขมันระเหย ผลรวมของแอมโมเนียไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน และซีไอดีละลาย ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ดังกล่าวตามระยะเวลาการย่อยสลาย ได้แก่ วันที่ 0 2 4 8 16 24 และ 30 ของการย่อยสลาย โดยมีข้อมูลผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.7 และมีรายละเอียดของผลการศึกษา ดังนี้

#### 4.2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตามระยะเวลาการย่อยสลายดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.14 จะเห็นว่า ของผสมภายในขวดหมักของทุกชุดทดลองตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7.23 – 7.54 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (Methane-forming microorganism) คือมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.7 – 7.5 (Deublein & Steinhauser, 2011) แสดงให้เห็นว่า ค่าพีเอชของชุดทดลองแต่ละชุดมีเสถียรภาพที่ดีตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย ยกเว้นในชุดทดลองฟางข้าว 10%-3d และ 15%-80C ที่มีค่าพีเอชในวันที่ 0 ของการย่อยสลาย ค่อนข้างสูง คือมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.78 และ 7.76 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีด่างบางส่วนหลงเหลืออยู่ในตัวอย่างฟางข้าวจากขั้นตอนการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 4.14. การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตามระยะเวลาการย่อยสลาย.  
(แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ตารางที่ 4.7

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญบางประการตามระยะเวลาการย่อยสลายในชุดการทดลองแต่ละชุด

พื้เอช	พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง						ปริมาณ							
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30
	Untreated	7.23	7.24	7.26	7.09	7.13	7.14	7.15	7.54	6.96	6.76	6.93	7.11	7.19	7.25
	5%-3d	7.46	6.92	6.90	6.89	7.11	7.14	7.30	7.50	6.99	6.73	6.92	7.11	7.21	7.26
	5%-12d	7.78	7.08	6.92	7.08	7.17	7.24	7.29	7.56	6.98	6.76	6.91	7.11	7.18	7.24
	10%-3d	7.57	7.02	6.70	6.90	7.09	7.17	7.25	7.52	6.94	6.83	6.92	7.07	7.25	7.29
	10%-6d	7.52	6.94	6.83	6.92	7.07	7.25	7.29	7.53	6.87	6.86	6.87	7.13	7.22	7.30
	10%-12d	7.56	7.06	6.84	6.90	7.10	7.25	7.32	7.52	6.80	6.88	6.90	7.08	7.16	7.30
	15%-3d	7.48	6.83	6.79	6.91	7.11	7.22	7.31	7.44	6.86	6.84	6.88	7.10	7.23	7.32
	15%-6d	7.38	6.92	6.78	6.89	7.08	7.23	7.34	7.38	6.94	6.77	6.90	7.07	7.21	7.33
	15%-12d	7.52	6.9	6.86	6.82	7.07	7.15	7.41	7.50	6.94	6.88	6.91	7.05	7.23	7.34
	20%-3d	7.76	7.12	6.87	6.97	7.17	7.28	7.30	7.51	6.96	6.91	6.89	7.14	7.21	7.34
	20%-6d														
	20%-12d														

ตารางที่ 4.7

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญบางประการตามระยะเวลาการย่อยสลายในชุดการทดลองแต่ละชุด (ต่อ)

พารามิเตอร์	ปริมาณ									
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
ชุดการทดลอง										
ความเป็นด่าง										
(มีลิกนินแคสซินคาร์บอนเนตต่อ	5,090 ± 6	5,372 ± 37	5,755 ± 0	5,884 ± 25	6,133 ± 6	6,134 ± 12	6,094 ± 6			
ลิตรา)	5,000 ± 0	5,245 ± 13	4,592 ± 13	4,838 ± 19	5,313 ± 13	5,491 ± 37	5,789 ± 74			
	5,344 ± 12	5,290 ± 6	5,247 ± 24	5,138 ± 18	5,626 ± 18	5,700 ± 17	6,168 ± 23			
	5,053 ± 13	5,102 ± 0	4,485 ± 38	4,663 ± 63	5,255 ± 44	5,601 ± 6	5,659 ± 49			
	5,081 ± 6	5,167 ± 31	4,787 ± 19	5,215 ± 43	5,410 ± 12	5,551 ± 19	5,768 ± 63			
	4,969 ± 19	5,044 ± 32	4,574 ± 13	4,735 ± 13	5,264 ± 19	5,337 ± 6	5,771 ± 37			
	4,925 ± 6	5,071 ± 6	4,512 ± 0	4,623 ± 32	5,069 ± 6	5,535 ± 0	5,728 ± 49			
	5,323 ± 6	5,103 ± 12	4,751 ± 30	4,784 ± 42	5,193 ± 0	5,826 ± 12	6,080 ± 18			
	5,305 ± 18	4,903 ± 18	5,004 ± 42	4,906 ± 0	5,392 ± 6	5,765 ± 0	5,285 ± 18			
	5,318 ± 25	5,133 ± 18	4,764 ± 36	4,763 ± 12	5,409 ± 66	5,639 ± 31	5,821 ± 18			
	5,318 ± 0	4,750 ± 18	4,709 ± 18	4,742 ± 30	5,260 ± 12	5,665 ± 6	5,825 ± 24			
	5,218 ± 85	4,730 ± 12	4,715 ± 6	4,785 ± 12	5,354 ± 23	5,578 ± 18	5,733 ± 29			
	5,064 ± 61	4,652 ± 12	4,783 ± 18	4,689 ± 18	5,408 ± 88	5,548 ± 24	5,649 ± 6			
	5,000 ± 103	5,026 ± 6	4,699 ± 18	4,689 ± 6	5,226 ± 64	5,590 ± 12	5,645 ± 12			
	4,983 ± 30	5,172 ± 30	4,737 ± 12	4,785 ± 12	5,230 ± 0	5,582 ± 0	5,783 ± 6			
	5,315 ± 18	5,180 ± 6	5,153 ± 24	5,155 ± 30	5,711 ± 30	5,069 ± 120	6,090 ± 29			
	5,280 ± 18	5,269 ± 0	5,123 ± 6	5,231 ± 30	5,652 ± 91	5,757 ± 29	5,820 ± 17			
	5,094 ± 0	5,027 ± 6	4,664 ± 6	4,813 ± 19	5,375 ± 0	5,489 ± 6	5,803 ± 38			
	5,302 ± 12	5,421 ± 0	5,089 ± 18	5,256 ± 6	5,639 ± 36	5,762 ± 10	6,123 ± 41			

ตารางที่ 4.7

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญบางประการตามระยะเวลาการย่อยสลายในชุดการทดลองแต่ละชุด (ต่อ)

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง	ปริมาณ									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
กรดไขมันระเหย (มีลิกรัมกรดอะซิติคต่อลิตร)	Untreated	370 ± 5	119 ± 13	169 ± 10	258 ± 0	232 ± 5	225 ± 15	198 ± 4			
	5%-3d	85 ± 11	97 ± 18	141 ± 8	127 ± 4	129 ± 5	153 ± 15	61 ± 4			
	5%-6d	55 ± 17	85 ± 3	87 ± 2	121 ± 21	85 ± 2	133 ± 11	103 ± 2			
	5%-12d	74 ± 11	36 ± 31	120 ± 10	119 ± 4	140 ± 13	86 ± 14	55 ± 12			
	10%-3d	48 ± 10	105 ± 1	143 ± 22	177 ± 16	141 ± 2	147 ± 4	101 ± 9			
	10%-6d	53 ± 13	37 ± 1	125 ± 8	115 ± 7	142 ± 17	89 ± 13	42 ± 7			
	10%-12d	48 ± 7	36 ± 1	75 ± 36	127 ± 1	143 ± 1	84 ± 13	46 ± 4			
	15%-3d	76 ± 18	127 ± 3	96 ± 12	148 ± 15	122 ± 3	108 ± 11	129 ± 10			
	15%-6d	72 ± 18	138 ± 14	95 ± 5	120 ± 12	129 ± 2	156 ± 5	103 ± 30			
	15%-12d	34 ± 16	100 ± 2	113 ± 5	114 ± 32	126 ± 9	128 ± 23	172 ± 23			
	5%-70C	22 ± 3	151 ± 17	117 ± 23	121 ± 14	146 ± 6	102 ± 9	154 ± 17			
	5%-80C	81 ± 0	134 ± 11	169 ± 3	138 ± 2	150 ± 23	138 ± 12	138 ± 8			
	5%-90C	72 ± 16	158 ± 6	137 ± 11	141 ± 0	139 ± 32	138 ± 12	115 ± 2			
	10%-70C	94 ± 12	90 ± 6	160 ± 3	144 ± 5	170 ± 5	128 ± 17	137 ± 13			
	10%-80C	84 ± 8	98 ± 2	129 ± 3	97 ± 0	150 ± 10	106 ± 0	64 ± 12			
10%-90C	57 ± 20	86 ± 2	59 ± 11	55 ± 7	114 ± 11	88 ± 13	67 ± 3				
15%-70C	78 ± 17	78 ± 2	121 ± 17	144 ± 11	128 ± 8	122 ± 13	83 ± 12				
15%-80C	50 ± 10	94 ± 12	125 ± 1	166 ± 12	177 ± 80	106 ± 22	80 ± 4				
15%-90C	119 ± 3	36 ± 0	100 ± 20	133 ± 2	164 ± 8	131 ± 11	95 ± 19				

ตารางที่ 4.7

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญบางประการตามระยะเวลาการย่อยสลายในชุดการทดลองแต่ละชุด (ต่อ)

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง	ปริมาณ							
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30	
ผลรวมของแอมโมเนียไนโตรเจน	Untreated	840 ± 5	923 ± 3	979 ± 5	997 ± 8	1,053 ± 10	1,075 ± 8	1,129 ± 21	
และแอมโมเนียไนโตรเจน	5%-3d	855 ± 0	895 ± 5	719 ± 0	794 ± 3	957 ± 16	1,055 ± 13	1,108 ± 0	
(มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร)	5%-6d	924 ± 18	886 ± 20	905 ± 35	860 ± 5	995 ± 15	1,060 ± 14	1,159 ± 10	
	5%-12d	868 ± 3	874 ± 3	706 ± 3	765 ± 0	946 ± 5	1,044 ± 3	1,073 ± 8	
	10%-3d	851 ± 0	893 ± 3	758 ± 5	887 ± 3	950 ± 10	1,010 ± 5	1,064 ± 3	
	10%-6d	859 ± 0	848 ± 3	728 ± 3	773 ± 0	949 ± 11	994 ± 0	1,094 ± 5	
	10%-12d	857 ± 3	855 ± 3	713 ± 8	754 ± 0	893 ± 0	1,026 ± 3	1,099 ± 8	
	15%-3d	900 ± 3	881 ± 3	779 ± 5	776 ± 0	891 ± 5	1,048 ± 10	1,123 ± 23	
	15%-6d	898 ± 10	879 ± 10	813 ± 3	806 ± 0	969 ± 0	1,041 ± 10	975 ± 3	
	15%-12d	894 ± 5	875 ± 5	760 ± 8	771 ± 2	957 ± 3	1,032 ± 8	1,073 ± 3	
	5%-70C	894 ± 5	875 ± 5	763 ± 8	773 ± 0	910 ± 13	1,023 ± 10	1,080 ± 3	
	5%-80C	839 ± 10	735 ± 8	719 ± 10	742 ± 12	900 ± 7	986 ± 13	1,030 ± 5	
	5%-90C	824 ± 0	731 ± 8	733 ± 5	719 ± 0	912 ± 10	986 ± 8	1,019 ± 10	
	10%-70C	831 ± 0	831 ± 10	729 ± 5	731 ± 12	891 ± 5	1,006 ± 10	1,024 ± 7	
	10%-80C	826 ± 3	847 ± 3	724 ± 3	735 ± 7	882 ± 2	1,002 ± 5	1,026 ± 20	
	10%-90C	929 ± 5	866 ± 13	880 ± 10	871 ± 0	1,046 ± 15	1,069 ± 79	1,152 ± 0	
	15%-70C	926 ± 5	907 ± 0	859 ± 5	873 ± 3	1,001 ± 23	1,064 ± 0	1,103 ± 2	
	15%-80C	846 ± 3	866 ± 0	743 ± 0	801 ± 5	939 ± 5	1,014 ± 5	1,072 ± 13	
	15%-90C	933 ± 0	941 ± 3	866 ± 0	900 ± 10	1,107 ± 51	1,055 ± 12	1,152 ± 5	

ตารางที่ 4.7

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สำคัญบางประการตามระยะเวลาการย่อยสลายในชุดการทดลองแต่ละชุด (ต่อ)

พารามิเตอร์	ปริมาณ						
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30
ซีโอดีละลาย							
Untreated	1,416 ± 9	746 ± 18	714 ± 18	959 ± 5	1,136 ± 4	981 ± 0	1,071 ± 18
5%-3d	850 ± 22	638 ± 5	819 ± 5	741 ± 75	835 ± 27	886 ± 65	888 ± 9
5%-6d	806 ± 46	829 ± 36	890 ± 5	1,036 ± 0	1,037 ± 33	1,017 ± 45	1,232 ± 138
5%-12d	577 ± 4	543 ± 32	851 ± 41	731 ± 35	722 ± 53	775 ± 37	813 ± 23
10%-3d	497 ± 0	546 ± 18	846 ± 27	787 ± 32	912 ± 9	763 ± 4	791 ± 26
10%-6d	593 ± 9	527 ± 0	781 ± 14	812 ± 9	672 ± 9	661 ± 14	826 ± 96
10%-12d	534 ± 4	476 ± 9	724 ± 14	850 ± 53	798 ± 18	739 ± 5	739 ± 27
15%-3d	760 ± 9	714 ± 9	663 ± 0	855 ± 14	734 ± 32	798 ± 33	821 ± 28
15%-6d	654 ± 5	688 ± 9	712 ± 14	799 ± 32	789 ± 9	759 ± 14	713 ± 5
15%-12d	576 ± 5	554 ± 5	827 ± 28	774 ± 0	783 ± 9	808 ± 19	812 ± 5
5%-70C	631 ± 0	855 ± 5	870 ± 14	695 ± 5	708 ± 5	736 ± 37	874 ± 19
5%-80C	683 ± 24	984 ± 37	1,099 ± 71	1,201 ± 75	1,190 ± 107	1,088 ± 9	1,132 ± 37
5%-90C	649 ± 14	1,047 ± 80	1,082 ± 47	1,241 ± 47	1,190 ± 5	1,048 ± 9	1,036 ± 60
10%-70C	756 ± 14	729 ± 23	1,146 ± 14	1,181 ± 0	1,181 ± 9	1,162 ± 85	1,112 ± 74
10%-80C	726 ± 0	755 ± 23	948 ± 38	1,108 ± 19	1,099 ± 51	975 ± 28	1,076 ± 32
10%-90C	819 ± 41	851 ± 5	936 ± 59	945 ± 82	913 ± 29	905 ± 50	1,132 ± 60
15%-70C	809 ± 14	838 ± 5	1,075 ± 70	1,172 ± 27	1,158 ± 62	1,058 ± 5	1,171 ± 5
15%-80C	540 ± 17	543 ± 14	792 ± 13	883 ± 23	863 ± 9	852 ± 9	800 ± 13
15%-90C	787 ± 37	768 ± 41	1,109 ± 5	1,175 ± 105	1,142 ± 48	1,023 ± 36	1,184 ± 14

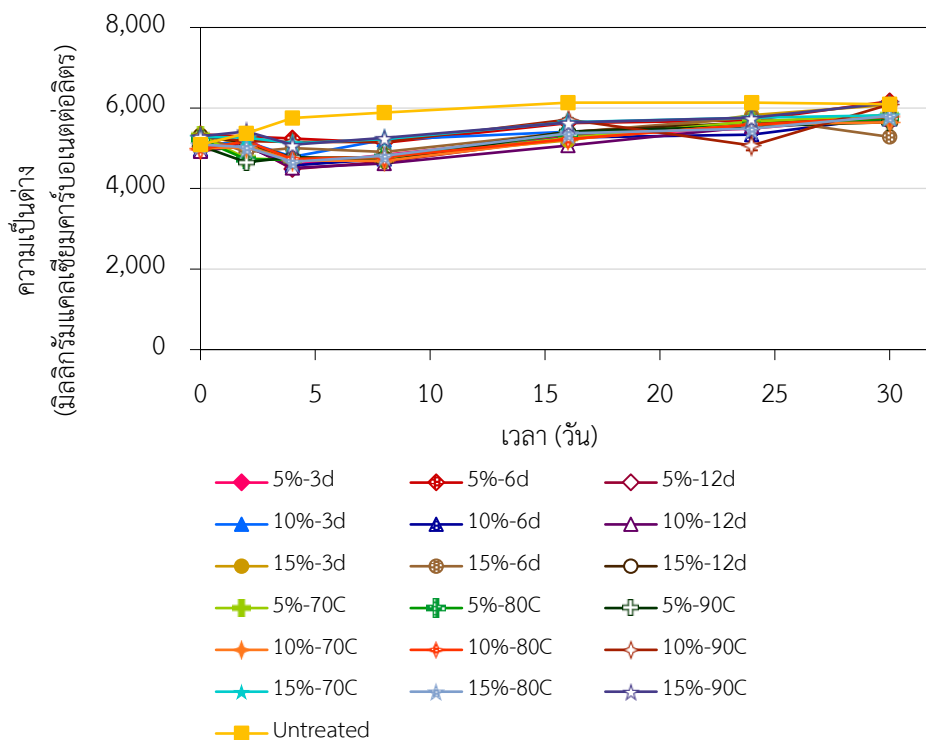
หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าของผสมภายในขวดหมักของชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าพีเอชค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน คือมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7.09 – 7.26 ส่วนในชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 18 ชุดทดลอง มีค่าพีเอชสูงในวันที่ 0 ของการย่อยสลาย (พีเอช 7.38 – 7.78) และมีแนวโน้มลดลงในระยะแรกของกระบวนการย่อยสลาย (วันที่ 1 – วันที่ 4 ของการย่อยสลาย) โดยลดลงต่ำสุดในวันที่ 4 ของการย่อยสลาย (พีเอช 6.70 – 6.92) และเพิ่มสูงขึ้นในระยะหลังของกระบวนการย่อยสลาย (วันที่ 4 – วันที่ 30) ทั้งนี้ลักษณะการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชดังกล่าวเป็นผลมาจากการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด (Acidogens) และจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน (Methanogens) ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งในระยะแรกของกระบวนการย่อยสลาย ภายในระบบยังอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรด จึงช่วยเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าว ส่งผลให้มีการผลิตกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนียเป็นปริมาณมากขึ้น จึงทำให้ค่าพีเอชลดลงอย่างรวดเร็ว และในขณะที่กระบวนการย่อยสลายยังคงดำเนินต่อไป จุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างกรดจะถูกจำกัดการเจริญเติบโตเนื่องจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบมีปริมาณลดลง ส่วนกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่สะสมอยู่ในระบบก็จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทนนำไปใช้ และก่อให้เกิดความเป็นต่างในรูปของแอมโมเนียม และไบคาร์บอเนต จึงทำให้ค่าพีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้น (J. J. Cheng, 2010; Deublein & Steinhauser, 2011)

#### 4.2.2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่าง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเป็นต่างตามระยะเวลาการย่อยสลายดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าของผสมภายในขวดหมักของทุกชุดทดลองมีความเป็นต่างเริ่มต้น (วันที่ 0 ของการย่อยสลาย) ประมาณ 5,000 – 5,300 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอต่อการต้านทานความเป็นกรดเป็นต่างเพื่อป้องกันการลดลงของค่าพีเอชอันเนื่องมาจากปริมาณกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่เพิ่มสูงขึ้นในระบบขณะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (2,500 – 5,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร) (McCarty, 1964) และเมื่อพิจารณาความมีเสถียรภาพของระบบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเป็นต่างในทุกชุดทดลองในภาพที่ 4.15 จะเห็นว่า ความเป็นต่างในทุกชุดทดลองตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน มีปริมาณอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง กล่าวคือ มีปริมาณความเป็นต่างอยู่ระหว่าง 4,485 – 6,168 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสามารถในการต้านทานความเป็นกรดเป็นต่างสูงและระบบมีเสถียรภาพดี

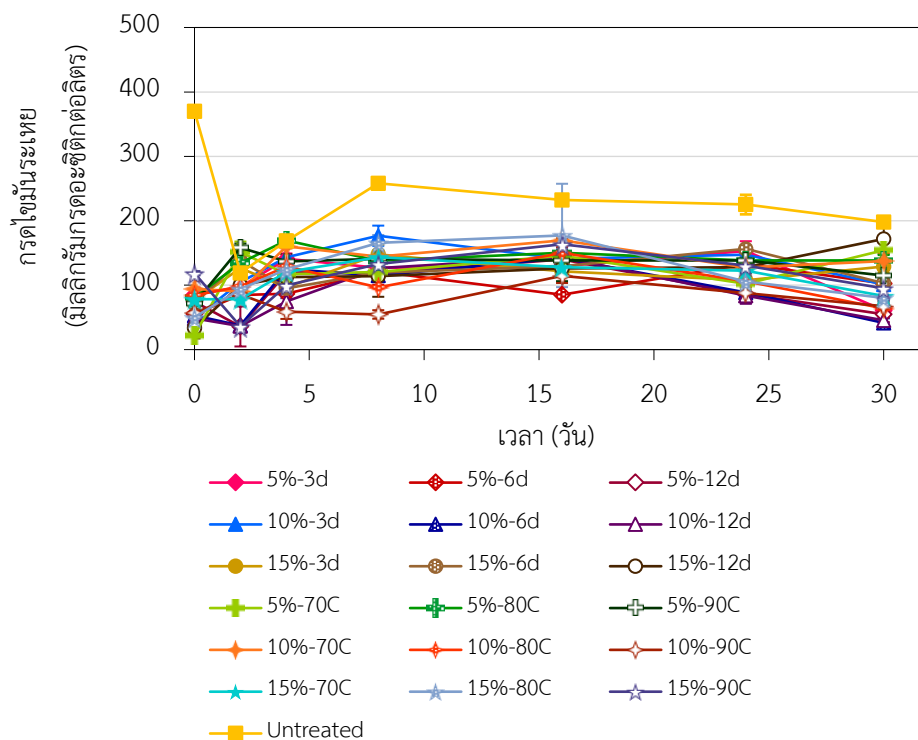




ภาพที่ 4.15. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่างตามระยะเวลาการย่อยสลาย.  
(แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

#### 4.2.3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยตามระยะเวลาการย่อยสลาย ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.16 พบว่า ของผสมภายในขวดหมักของทุกชุดทดลองตลอดช่วงระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยค่อนข้างต่ำมาก โดยมีปริมาณเพียง 22 - 370 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร ปริมาณกรดไขมันระเหยจึงไม่ส่งผลกระทบต่อกรดลดลงของค่าพีเอชของระบบในทุกชุดทดลอง นอกจากนี้กรดไขมันระเหยในทุกชุดทดลองตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย ยังมีปริมาณที่ต่ำกว่าปริมาณที่ส่งผลให้เกิดการยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (1,500 - 2,000 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร) (Tabatabaei & Ghanavati, 2018) จึงแสดงให้เห็นว่ากระบวนการย่อยสลายในทุกชุดทดลองอยู่ในสถานะที่สมดุลและมีเสถียรภาพดี

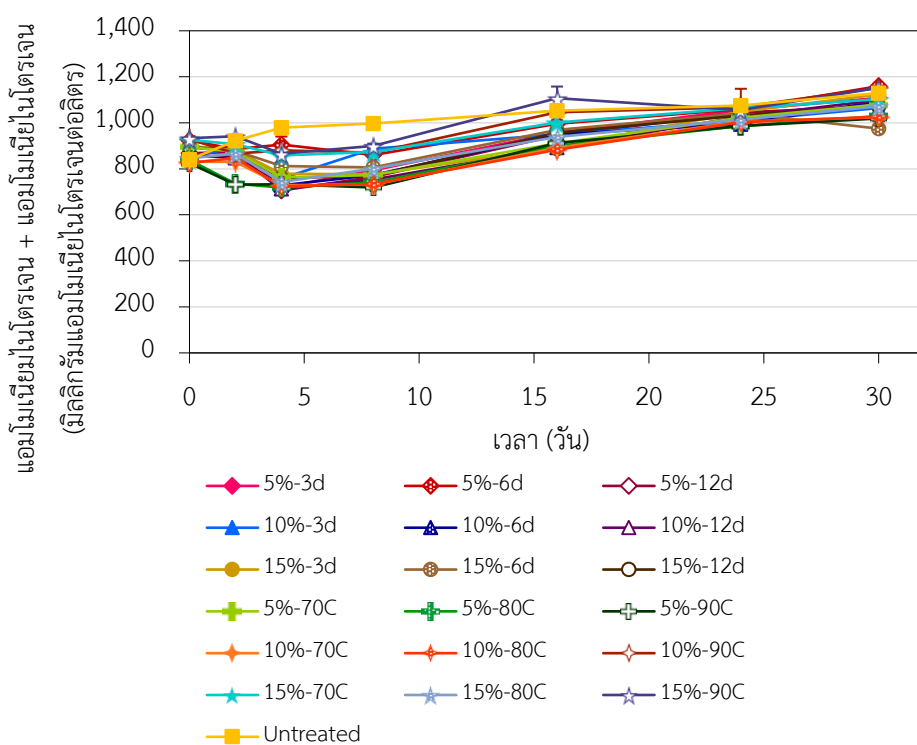


ภาพที่ 4.16. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยตามระยะเวลาการย่อยสลาย. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

#### 4.2.4 การเปลี่ยนแปลงผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน

ไนโตรเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) จัดเป็นสารอาหารที่สำคัญที่สุดสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มที่ทำหน้าที่ในการสร้างมีเทน และแอมโมเนียมไนโตรเจนนี้จะถูกนำไปใช้ในการย่อยสลายกรดไขมันในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) เป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลาง (By-product) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียม และไบคาร์บอเนต ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่าในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีทั้งการเกิดขึ้นและการถูกใช้ไปของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนในทุกชุดทดลองตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ซึ่งในที่นี่แสดงในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.17 พบว่าในทุกชุดทดลองทุกชุดมีผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนตลอดระยะเวลาการย่อยสลายอยู่ระหว่าง 706 – 1,159 มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนในระบบที่มีปริมาณต่ำกว่า 200 มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนต่อ

ลิตร ได้รับการพิจารณาว่าเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ แต่หากมีปริมาณสูงกว่า 1,500 – 1,700 มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร ก็จะก่อให้เกิดการยับยั้งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศขึ้นได้ (Y. Chen, Cheng, & Creamer, 2008) ทั้งนี้ผลรวมของแอมโมเนียไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนตลอดระยะเวลาการย่อยสลายของทุกชุดทดลองที่มีปริมาณสูงกว่าระดับที่เป็นประโยชน์ ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากสารอาหารไนโตรเจนที่หลงเหลืออยู่ในระบบซึ่งมีการเติมลงไปในรูปแบบของแอมโมเนียมคลอไรด์ในทุกชุดทดลองขณะเริ่มต้นการทดลองตามวิธีบีเอ็มพี อย่างไรก็ตามผลรวมของแอมโมเนียไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนตลอดระยะเวลาการย่อยสลายของทุกชุดทดลองก็มีปริมาณต่ำกว่าปริมาณที่จะก่อให้เกิดการยับยั้งต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ



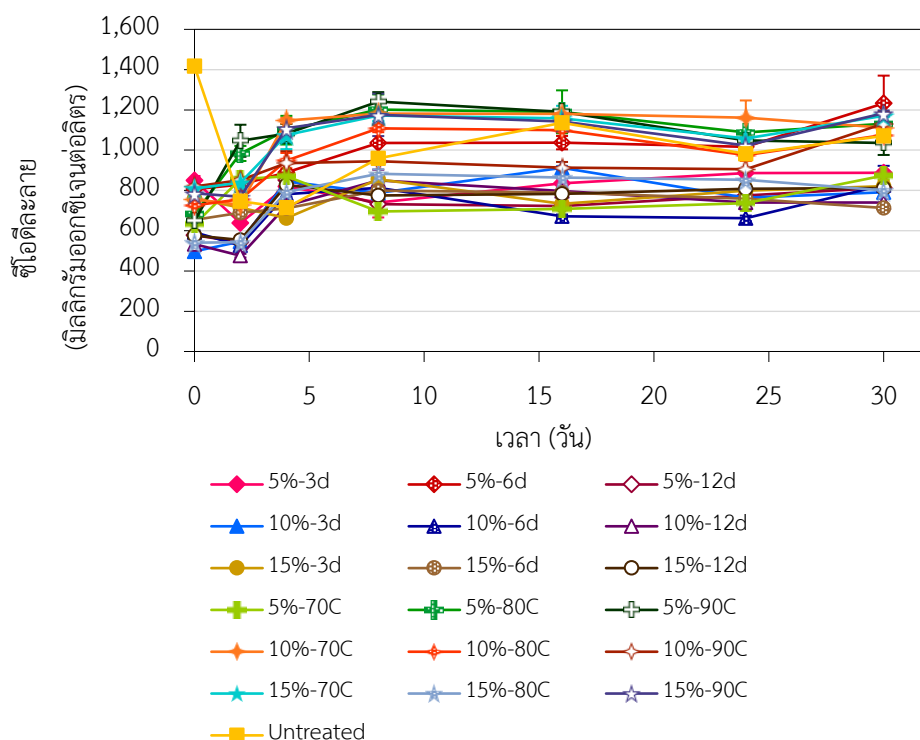
ภาพที่ 4.17. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลรวมของแอมโมเนียไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนตามระยะเวลาการย่อยสลาย.

(แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

#### 4.2.5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอติละลาย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอติละลายในทุกชุดทดลองตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.18 จะเห็นว่า มีปริมาณซีโอติละลาย 476 – 1,416 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร โดยวันที่ 0 ของการย่อยสลาย ชุดทดลองฟางข้าวที่

ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณซีโอดีละลาย 1,416 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าในชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ (497 - 850 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพได้สูญเสียสารอินทรีย์ที่ละลายง่ายบางส่วนไปในระหว่างกระบวนการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ปริมาณซีโอดีละลายซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถละลายได้มีปริมาณน้อยกว่าในชุดทดสอบของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



ภาพที่ 4.18. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลายตามระยะเวลาการย่อยสลาย. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

#### 4.2.6 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว ก่อนการย่อยสลาย (วันที่ 0 ของการย่อยสลาย) และหลังการย่อยสลาย (วันที่ 30 ของการย่อยสลาย) ในชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.19 – 4.21

จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.19 จะเห็นว่า ของแข็งรวมหลังการย่อยสลายของชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพทุกชุดทดลองมีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของแข็งรวมก่อนการย่อยสลาย โดยของแข็งรวมก่อนการ

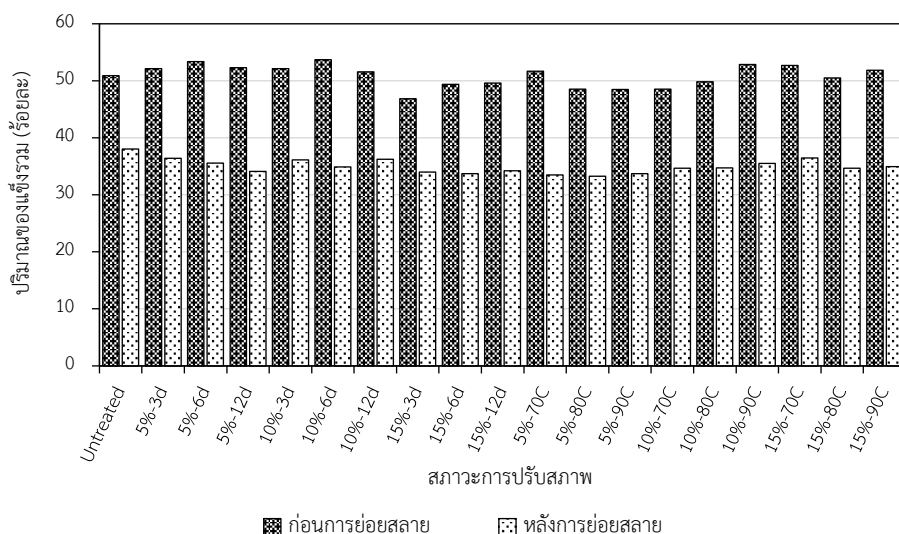
ย่อยสลายในชุดทดลองแต่ละชุดมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 46.88 – 53.72 ส่วนของแข็งรวมหลังการย่อยสลายมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 33.30 – 38.05 ทั้งนี้การลดลงของปริมาณของแข็งรวมในชุดทดลองแต่ละชุดเป็นผลเนื่องมาจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในฟางข้าวแต่ละสภาวะถูกย่อยสลายไปโดยจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ เปลี่ยนรูปเป็นก๊าซต่าง ๆ และน้ำ

#### ตารางที่ 4.8

ปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว ก่อนและหลังการย่อยสลาย

สภาวะ การปรับสภาพ	ของแข็งรวม (ร้อยละ)		ของแข็งระเหย (ร้อยละ)		ของแข็งคงตัว (ร้อยละ)	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
Untreated	50.92 ± 1.73	38.05 ± 0.43	40.76 ± 1.36	28.53 ± 0.37	10.15 ± 0.37	9.52 ± 0.07
5%-3d	52.13 ± 0.82	36.43 ± 1.08	42.28 ± 0.66	26.17 ± 0.47	9.85 ± 0.16	10.26 ± 0.64
5%-6d	53.34 ± 0.77	35.58 ± 0.36	42.92 ± 0.62	25.54 ± 0.08	10.42 ± 0.16	10.04 ± 0.32
5%-12d	52.28 ± 1.14	34.10 ± 1.14	42.60 ± 0.95	24.78 ± 0.84	9.69 ± 0.20	9.33 ± 0.30
10%-3d	52.13 ± 0.46	36.13 ± 1.18	41.86 ± 0.36	26.48 ± 0.90	10.26 ± 0.10	9.65 ± 0.28
10%-6d	53.72 ± 0.25	34.90 ± 1.07	43.43 ± 0.24	25.39 ± 0.78	10.29 ± 0.04	9.51 ± 0.29
10%-12d	51.60 ± 1.65	36.24 ± 0.53	41.75 ± 1.33	26.34 ± 0.37	9.85 ± 0.31	9.90 ± 0.16
15%-3d	46.88 ± 0.99	33.99 ± 1.34	37.46 ± 0.77	24.17 ± 0.95	9.43 ± 0.22	9.82 ± 0.39
15%-6d	49.38 ± 0.31	33.70 ± 0.41	39.67 ± 0.22	23.89 ± 0.26	9.72 ± 0.10	9.81 ± 0.15
15%-12d	49.62 ± 0.57	34.22 ± 0.35	39.86 ± 0.50	24.39 ± 0.23	9.76 ± 0.08	9.83 ± 0.14
5%-70C	51.66 ± 0.27	33.50 ± 0.46	41.50 ± 0.22	23.93 ± 0.34	10.15 ± 0.06	9.57 ± 0.12
5%-80C	48.56 ± 0.66	33.30 ± 2.81	38.73 ± 0.53	23.33 ± 2.64	9.83 ± 0.13	9.96 ± 0.19
5%-90C	48.46 ± 0.84	33.74 ± 0.19	38.94 ± 0.67	24.11 ± 0.22	9.52 ± 0.17	9.63 ± 0.20
10%-70C	48.57 ± 1.18	34.68 ± 0.23	38.79 ± 0.93	24.49 ± 0.16	9.78 ± 0.25	10.19 ± 0.07
10%-80C	49.81 ± 0.78	34.71 ± 0.58	39.45 ± 0.59	24.48 ± 0.38	10.36 ± 0.19	10.23 ± 0.20
10%-90C	52.85 ± 0.84	35.54 ± 0.78	42.43 ± 0.72	25.63 ± 0.56	10.41 ± 0.13	9.91 ± 0.23

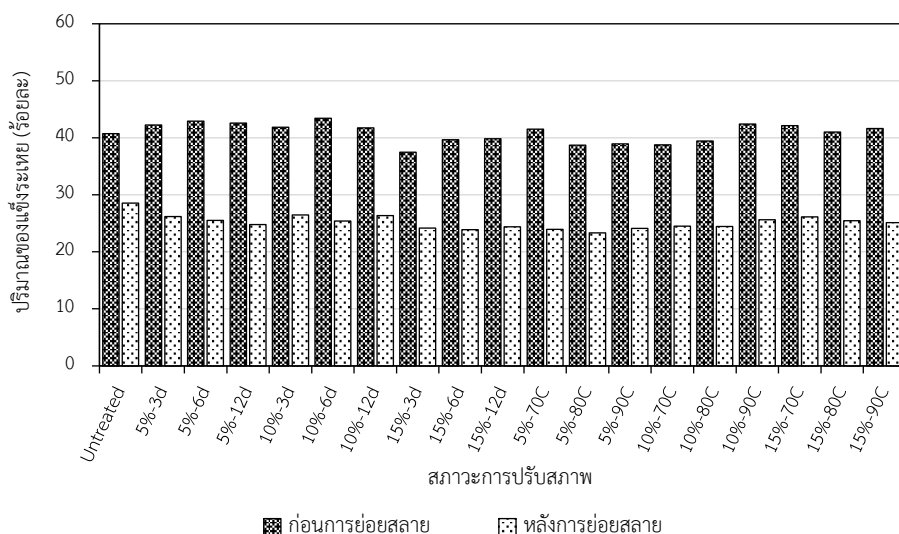
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.19. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของเอนไซม์ก่อนและหลังการย่อยสลาย.

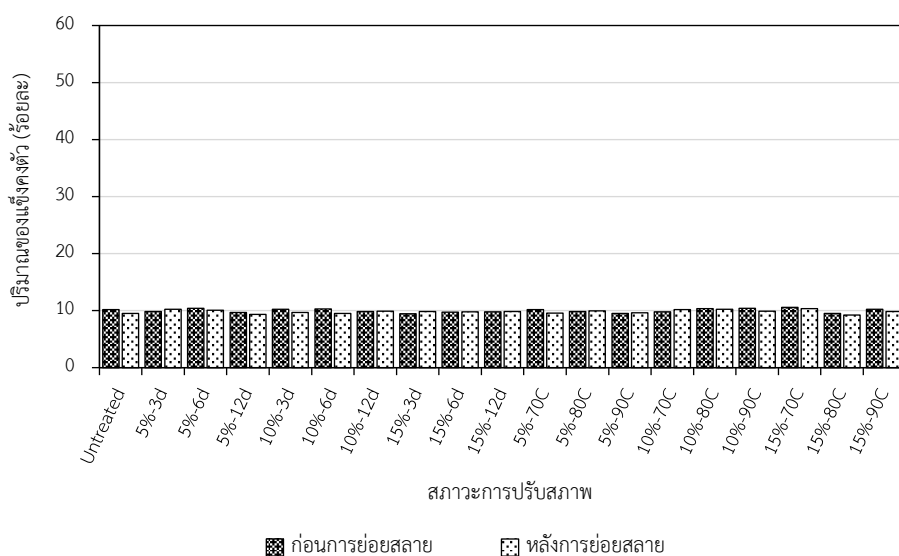
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณของเอนไซม์ของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.20 จะเห็นว่า ของเอนไซม์ก่อนการย่อยสลายของชุดทดลองแต่ละชุดมีปริมาณของเอนไซม์อยู่ในช่วงร้อยละ 37.46 – 43.43 และมีปริมาณลดลงหลังการย่อยสลาย โดยมีปริมาณของเอนไซม์หลังการย่อยสลายอยู่ในช่วงร้อยละ 23.33 – 37.46 แสดงให้เห็นว่าฟางข้าวในชุดการทดลองแต่ละชุดมีปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ลดลง

เมื่อพิจารณาปริมาณของเอนไซม์ที่ลดลงดังกล่าว จะเห็นว่าการย่อยสลายฟางข้าวในชุดทดลองแต่ละชุดสามารถกำจัดปริมาณของเอนไซม์ได้ โดยการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพสามารถกำจัดของเอนไซม์ได้ร้อยละ 30.01 ส่วนการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ สามารถกำจัดของเอนไซม์ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 35.47 – 42.35 ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จึงอาจกล่าวได้ว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ฟางข้าวสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้น โดยการย่อยสลายฟางข้าว 5%-70C สามารถกำจัดปริมาณของเอนไซม์ได้สูงที่สุด (ร้อยละ 42.35) รองลงมาคือฟางข้าว 5%-12d (ร้อยละ 41.83) และฟางข้าว 10%-6d (ร้อยละ 41.54) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.20. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของเอนไซม์ก่อนและหลังการย่อยสลาย.

สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณของเอนไซม์ของฟางข้าวแต่ละสภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.21 จะเห็นว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแต่ละสภาวะมีปริมาณของเอนไซม์ก่อนการย่อยสลายและหลังการย่อยสลายที่ใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 9 – 10 เนื่องจากของเอนไซม์คือสารอินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้และยังคงอยู่ในระบบไม่มีการสูญหายไปในช่วงการย่อยสลาย



ภาพที่ 4.21. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของเอนไซม์ก่อนและหลังการย่อยสลาย.

#### 4.3 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกภาคในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี ที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ในชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จำนวน 18 สภาวะ และชุดควบคุม (Control) ของชุดทดลองแต่ละชุด มีผลการวิเคราะห์แบ่งตามเซตของการทดลอง (เซตที่ 1 – 5) แสดงดังตารางที่ 4.9 – 4.13 และภาพที่ 4.22 โดยมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ดังนี้

จากตารางที่ 4.9 – 4.13 และภาพที่ 4.22 จะเห็นว่า ชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งเป็นชุดทดลองที่บรรจุด้วยวัสดุตั้งต้นและหัวเชื้อจุลินทรีย์ มีปริมาณก๊าซมีเทนรายวันสูงกว่าในชุดควบคุมซึ่งบรรจุหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ สามารถย่อยสลายผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกภาคและให้ก๊าซมีเทนได้ เมื่อพิจารณาชุดควบคุมซึ่งบรรจุหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว จะเห็นว่าในช่วง 1 – 2 วันแรกของการย่อยสลายในชุดควบคุมมีปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน 40 – 86 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปริมาณก๊าซมีเทนรายวันในชุดควบคุมแต่ละชุดมีปริมาณลดลงและมีปริมาณค่อนข้างคงที่ โดยวันสุดท้ายของการย่อยสลาย (วันที่ 30 ของการย่อยสลาย) ในชุดควบคุมมีปริมาณก๊าซมีเทนเพียง 11 – 22 มิลลิลิตร ทั้งนี้ปริมาณก๊าซมีเทนในชุดควบคุมที่มีปริมาณค่อนข้างสูงในช่วง 1 – 2 วันแรก เนื่องมาจากในหัวเชื้อจุลินทรีย์อาจมีสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้บางส่วนหลงเหลืออยู่ในช่วงแรกของการย่อยสลายจุลินทรีย์จึงย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าวและให้ผลิตภัณฑ์คือก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าว

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นในชุดทดลองฟางข้าวต่าง ๆ จะเห็นว่าในชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 0 – 1 ของการย่อยสลาย และมีปริมาณลดลงในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย และคงที่ในระหว่างวันที่ 2 – 5 ของการย่อยสลาย คือมีปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน 17 – 42 มิลลิลิตร จากนั้นก๊าซมีเทนรายวันมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งในวันที่ 6 – 8 ของการย่อยสลาย โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนรายวันสูงสุดคือ 231 มิลลิลิตร ในวันที่ 8 ของการย่อยสลาย หลังจากนั้นก๊าซมีเทนรายวันมีปริมาณลดลง และเริ่มมีปริมาณที่ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 24 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 30 ของการย่อยสลาย โดยมีปริมาณอยู่ระหว่าง 37 – 60 มิลลิลิตร



ตารางที่ 4.9

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 1)

ชุดการทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
Control	0.0	1.0	2.0	2.4	3.0	3.4	4.0	4.4	5.1	6.1	8.0	9.1	11.1	13.1	16.0	19.1	22.1	24.0	27.3	30.0
	60	41	14	14	13	7	11	15	12	14	21	18	17	21	32	34	26	21	25	14
	± 0	± 1	± 2	± 1	± 1	± 4	± 1	± 4	± 0	± 3	± 4	± 1	± 1	± 1	± 3	± 1	± 1	± 5	± 1	± 0
Untreated	0	178	82	27	32	18	23	17	28	101	231	92	120	74	84	87	66	37	60	45
	± 3	± 5	± 1	± 1	± 0	± 0	± 1	± 1	± 2	± 19	± 15	± 7	± 13	± 4	± 6	± 11	± 7	± 3	± 10	± 5
10%-3d	0	76	204	214	293	172	146	67	76	115	116	59	132	78	71	57	37	24	38	26
	± 1	± 64	± 50	± 48	± 48	± 7	± 44	± 23	± 16	± 94	± 34	± 10	± 79	± 32	± 21	± 12	± 9	± 4	± 14	± 8
15%-80C	0	75	295	275	341	172	93	44	90	103	92	44	89	62	47	54	26	21	30	22
	± 5	± 12	± 29	± 40	± 40	± 45	± 20	± 11	± 37	± 79	± 19	± 6	± 25	± 13	± 3	± 8	± 23	± 3	± 1	± 2

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.10

## ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 2)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
	วันที่ 0.0	วันที่ 1.0	วันที่ 1.9	วันที่ 2.4	วันที่ 3.0	วันที่ 3.4	วันที่ 4.0	วันที่ 4.4	วันที่ 5.1	วันที่ 6.1	วันที่ 8.0	วันที่ 10.1	วันที่ 12.1	วันที่ 14.2	วันที่ 16.0	วันที่ 19.1	วันที่ 22.1	วันที่ 24.0	วันที่ 27.1	วันที่ 30.0
Control	0	86 ± 3	54 ± 4	22 ± 5	22 ± 1	14 ± 1	17 ± 2	10 ± 1	17 ± 1	5 ± 2	34 ± 4	32 ± 2	23 ± 1	22 ± 1	16 ± 1	38 ± 10	30 ± 4	13 ± 1	21 ± 4	22 ± 1
5%-3d	0	113 ± 7	292 ± 23	253 ± 52	297 ± 7	168 ± 67	191 ± 43	107 ± 6	121 ± 33	71 ± 20	116 ± 16	79 ± 3	62 ± 2	60 ± 2	49 ± 2	68 ± 15	62 ± 7	31 ± 3	39 ± 2	30 ± 3
5%-12d	0	96 ± 1	322 ± 36	395 ± 62	287 ± 24	105 ± 32	146 ± 72	131 ± 12	133 ± 23	70 ± 3	117 ± 4	92 ± 3	75 ± 4	61 ± 3	48 ± 3	66 ± 5	57 ± 2	29 ± 2	38 ± 1	27 ± 2
10%-6d	0	98 ± 6	272 ± 12	232 ± 16	281 ± 30	212 ± 18	242 ± 18	111 ± 6	110 ± 6	65 ± 6	104 ± 8	79 ± 2	73 ± 2	75 ± 2	57 ± 3	71 ± 5	60 ± 3	31 ± 3	39 ± 1	28 ± 1
10%-12d	0	96 ± 2	316 ± 23	164 ± 90	269 ± 36	247 ± 82	207 ± 38	109 ± 7	137 ± 26	70 ± 11	97 ± 4	79 ± 5	69 ± 2	73 ± 7	61 ± 9	76 ± 6	62 ± 5	33 ± 2	39 ± 2	27 ± 1

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.11

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 3)

ชุดทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
Control	0	66 ± 13	43 ± 4	16 ± 9	17 ± 0	11 ± 1	3.9 ± 1	4.9 ± 2	5.9 ± 2	6.9 ± 0	7.9 ± 1	9.9 ± 2	11.9 ± 3	13.9 ± 3	15.9 ± 2	18.9 ± 0	21.9 ± 2	23.9 ± 1	27.1 ± 1	29.9 ± 1
15%-3d	0	95 ± 3	364 ± 36	361 ± 15	279 ± 18	102 ± 6	68 ± 4	64 ± 3	59 ± 2	133 ± 20	92 ± 48	109 ± 7	69 ± 3	45 ± 2	41 ± 2	48 ± 2	37 ± 1	25 ± 1	31 ± 2	23 ± 0
15%-6d	0	89 ± 2	395 ± 13	329 ± 37	280 ± 18	108 ± 9	70 ± 5	63 ± 3	84 ± 18	175 ± 19	106 ± 10	99 ± 10	67 ± 1	48 ± 4	44 ± 2	46 ± 2	39 ± 2	24 ± 2	30 ± 2	20 ± 1
15%-12d	0	86 ± 3	156 ± 26	269 ± 22	354 ± 54	215 ± 25	161 ± 19	146 ± 16	100 ± 20	88 ± 20	94 ± 33	95 ± 16	68 ± 3	52 ± 7	47 ± 8	50 ± 9	38 ± 3	24 ± 4	30 ± 0	19 ± 2
5%-70C	0	82 ± 3	331 ± 78	378 ± 37	272 ± 37	104 ± 17	65 ± 5	64 ± 2	88 ± 27	149 ± 9	93 ± 1	89 ± 2	64 ± 2	48 ± 4	37 ± 3	45 ± 2	36 ± 2	23 ± 1	29 ± 2	20 ± 1

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.12

ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกขุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 4)

ชุดทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																					
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
การทดลอง	0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.9	5.9	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	18.9	21.9	23.9	26.9	29.9	
Control	0	47 ± 20	40 ± 1	22 ± 2	18 ± 1	14 ± 1	13 ± 0	21 ± 1	21 ± 1	20 ± 1	16 ± 1	14 ± 2	24 ± 1	22 ± 1	17 ± 1	17 ± 1	16 ± 3	13 ± 1	11 ± 3	11 ± 1	11 ± 1	12 ± 1
5%-80C	0	74 ± 1	426 ± 19	343 ± 47	195 ± 14	70 ± 4	132 ± 10	173 ± 7	106 ± 5	106 ± 5	68 ± 4	54 ± 8	82 ± 12	64 ± 1	63 ± 11	68 ± 8	52 ± 8	34 ± 4	21 ± 2	26 ± 3	26 ± 3	23 ± 2
5%-90C	0	71 ± 1	415 ± 33	185 ± 20	213 ± 17	103 ± 12	170 ± 14	228 ± 2	121 ± 2	121 ± 2	77 ± 6	55 ± 7	74 ± 11	64 ± 11	65 ± 10	62 ± 16	54 ± 11	39 ± 5	25 ± 2	25 ± 2	28 ± 2	26 ± 4
10%-70C	0	88 ± 2	516 ± 33	249 ± 13	155 ± 15	69 ± 12	137 ± 14	170 ± 11	98 ± 5	98 ± 5	67 ± 3	45 ± 1	66 ± 2	64 ± 5	77 ± 8	71 ± 9	55 ± 6	35 ± 3	23 ± 2	27 ± 2	27 ± 2	23 ± 1
10%-80C	0	77 ± 1	480 ± 35	240 ± 7	173 ± 20	70 ± 6	140 ± 11	171 ± 11	98 ± 5	98 ± 5	68 ± 7	48 ± 1	73 ± 2	74 ± 2	72 ± 2	67 ± 3	54 ± 1	35 ± 2	23 ± 1	24 ± 1	24 ± 1	24 ± 1

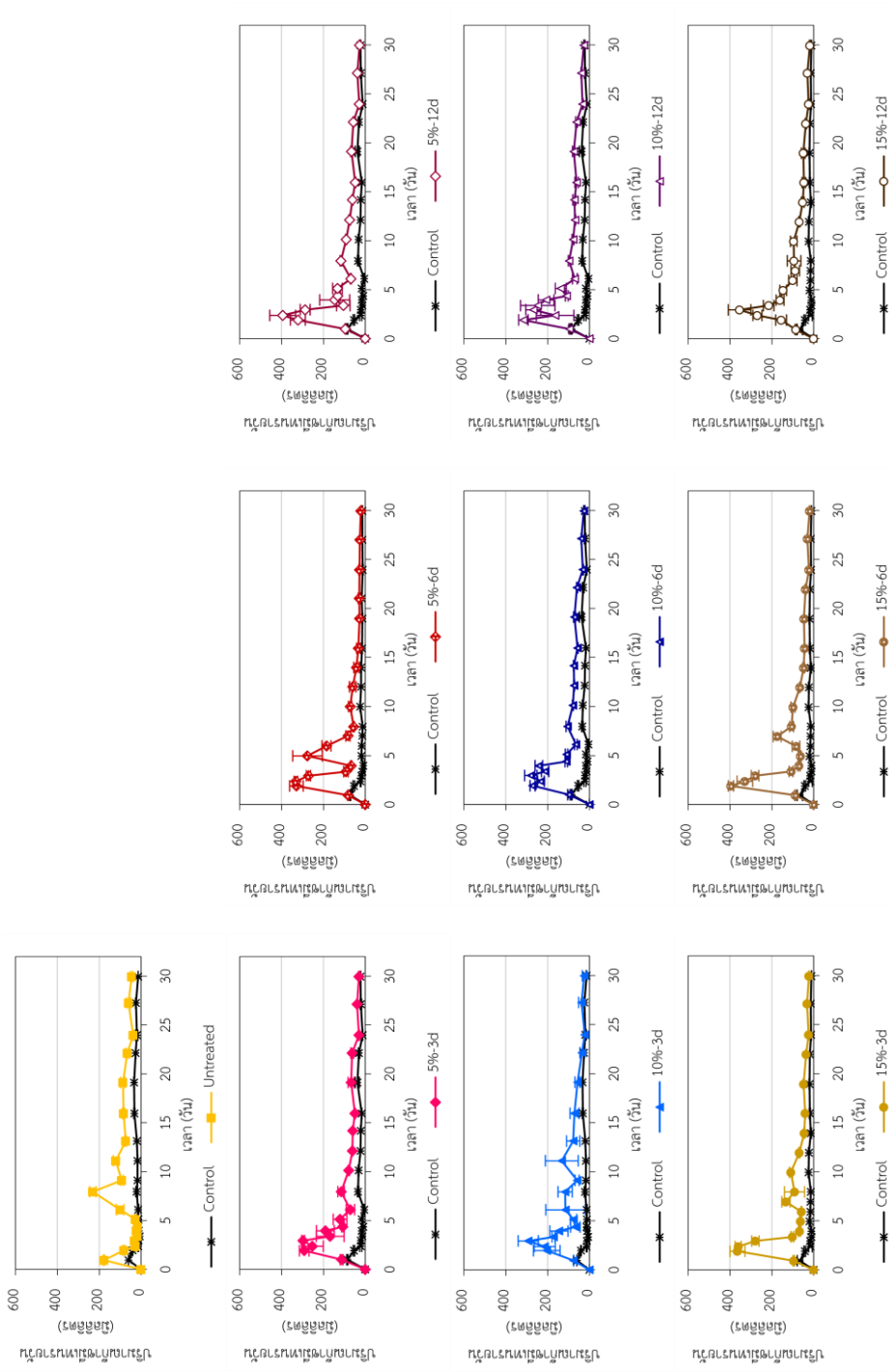
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.13

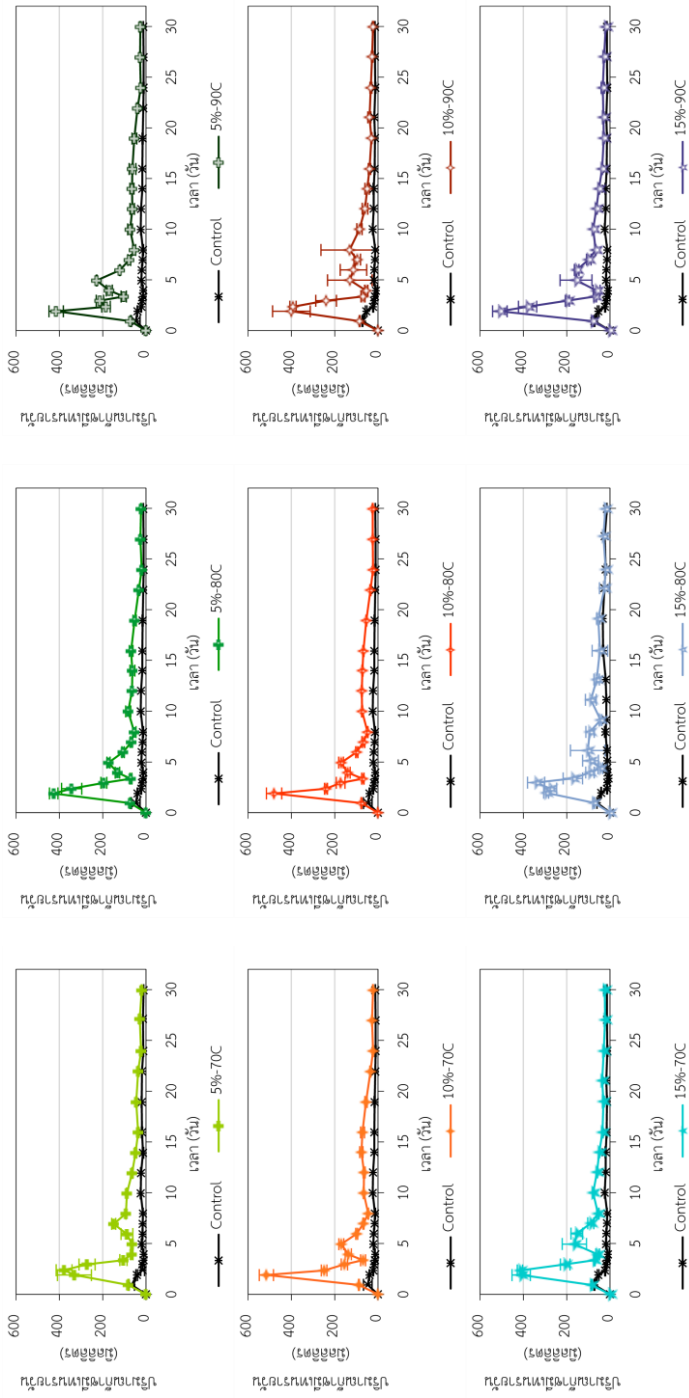
## ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากกขตการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 5)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
Control	0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	5.0	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	19.0	21.0	23.9	27.0	29.9
	72	55	22	18	14	9	18	17	14	13	24	20	21	15	14	17	12	14	14	14
	± 2	± 4	± 2	± 2	± 2	± 2	± 5	± 2	± 1	± 1	± 0	± 1	± 1	± 2	± 2	± 1	± 2	± 0	± 1	± 1
5%-6d	0	83	329	332	272	93	67	276	186	83	56	73	61	43	33	28	28	28	25	21
	± 1	± 32	± 9	± 10	± 11	± 11	± 3	± 70	± 22	± 10	± 4	± 8	± 15	± 13	± 9	± 2	± 6	± 3	± 1	± 1
10%-90C	0	85	400	393	240	69	54	130	113	96	131	86	60	50	39	30	40	33	27	23
	± 1	± 87	± 15	± 48	± 9	± 8	± 103	± 61	± 15	± 133	± 12	± 13	± 10	± 6	± 2	± 7	± 5	± 4	± 3	± 3
15%-70C	0	85	410	416	207	72	57	165	153	89	56	78	60	49	35	30	36	28	23	24
	± 3	± 42	± 12	± 22	± 3	± 3	± 9	± 56	± 27	± 14	± 5	± 3	± 2	± 1	± 3	± 4	± 2	± 3	± 3	± 5
15%-90C	0	81	509	381	197	69	62	157	154	98	67	78	63	51	36	29	30	33	28	20
	± 4	± 34	± 42	± 10	± 6	± 6	± 16	± 74	± 11	± 10	± 1	± 3	± 4	± 2	± 1	± 3	± 3	± 8	± 4	± 1

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.22. ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



ภาพที่ 4.22. ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (ต่อ)

ส่วนในชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ มีปริมาณก๊าซมีเทนในระหว่างวันที่ 0 – 1 ของการย่อยสลาย ใกล้เคียงกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในชุดควบคุม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหัวเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงระยะการปรับตัว หลังจากนั้นปริมาณก๊าซมีเทนรายวันได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 2 ของการย่อยสลาย โดยชุดทดลองที่มีปริมาณก๊าซมีเทนในวันที่ 2 ของการย่อยสลายสูงที่สุดคือ 10%-70C รองลงมาคือ 15%-90C คือมีปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน 516 และ 509 มิลลิลิตร ตามลำดับ และหลังจากวันที่ 2 ของการย่อยสลาย จะเห็นว่าปริมาณก๊าซมีเทนรายวันในแต่ละชุดทดสอบมีปริมาณลดลง และเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน และเริ่มมีปริมาณคงที่ ตั้งแต่วันที่ 24 ของการย่อยสลาย จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 30 ของการย่อยสลาย

#### 4.4 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี

ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพต่าง ๆ และชุดควบคุมของแต่ละชุดทดลอง ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศด้วยวิธีบีเอ็มพี ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน แสดงดังตารางที่ 4.14 – 4.18 และภาพที่ 4.23

จากตารางที่ 4.14 – 4.18 และภาพที่ 4.23 จะเห็นว่า ชุดควบคุมของชุดทดลองแต่ละชุดมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน อยู่ระหว่าง 369 – 500 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำกว่าในชุดทดลองค่อนข้างมาก โดยคิดเป็นร้อยละ 17.8 – 29.4 ของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในชุดทดลอง สำหรับในชุดทดลองฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งเป็นชุดทดลองที่บรรจุด้วยฟางข้าวแต่ละสภาวะและหัวเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณก๊าซมีเทนสะสม 1,403 – 2,294 มิลลิลิตร โดยชุดทดลองฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมน้อยที่สุดคือมีปริมาณเพียง 1,403 มิลลิลิตร ส่วนชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมค่อนข้างสูง คือมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสม 1,974 – 2,294 มิลลิลิตร โดยชุดทดลองฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพที่มีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุดคือ ชุดทดลองฟางข้าว 5%-12d (2,294 มิลลิลิตร) รองลงมาคือ ชุดทดลองฟางข้าว 10%-6d (2,241 มิลลิลิตร) อย่างไรก็ตามผลของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในชุดทดลองฟางข้าวดังกล่าวเป็นผลรวมของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากวัสดุตั้งต้นและปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ จึงไม่สามารถเปรียบเทียบผลของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงต้องคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากวัสดุตั้งต้นหรือฟางข้าวเพียงอย่างเดียว



## ตารางที่ 4.14

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 1)

ชุดการทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
Control	0	60	101	115	128	135	146	160	172	186	207	225	242	262	294	328	354	374	399	413
Untreated	0	± 0	± 1	± 4	± 2	± 6	± 5	± 8	± 8	± 6	± 1	± 1	± 1	± 1	± 1	± 3	± 2	± 7	± 8	± 8
10%-3d	0	76	280	494	787	959	1,105	1,172	1,249	1,363	1,480	1,539	1,671	1,749	1,821	1,878	1,915	1,939	1,970	1,996
15%-80C	0	± 1	± 63	± 112	± 157	± 160	± 118	± 100	± 84	± 124	± 156	± 147	± 75	± 47	± 35	± 36	± 42	± 44	± 74	± 83
	0	75	370	645	986	1,158	1,251	1,295	1,385	1,488	1,581	1,624	1,713	1,775	1,821	1,875	1,901	1,922	1,952	1,974
	± 5	± 10	± 31	± 37	± 68	± 86	± 92	± 61	± 61	± 21	± 40	± 35	± 10	± 10	± 46	± 42	± 46	± 48	± 48	± 47

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.15

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 2)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
	วันที่ 0.0	วันที่ 1.0	วันที่ 1.9	วันที่ 2.4	วันที่ 3.0	วันที่ 3.4	วันที่ 4.0	วันที่ 4.4	วันที่ 5.1	วันที่ 6.1	วันที่ 8.0	วันที่ 10.1	วันที่ 12.1	วันที่ 14.2	วันที่ 16.0	วันที่ 19.1	วันที่ 22.1	วันที่ 24.0	วันที่ 27.1	วันที่ 30.0
Control	0	86	140	162	184	198	215	225	242	248	282	314	338	359	376	414	444	457	478	500
5%-3d	0	± 3	± 4	± 4	± 4	± 5	± 7	± 6	± 6	± 6	± 3	± 5	± 4	± 5	± 4	± 14	± 17	± 17	± 14	± 14
5%-12d	0	96	418	813	1,100	1,205	1,352	1,483	1,616	1,686	1,802	1,894	1,969	2,030	2,078	2,143	2,200	2,229	2,267	2,294
10%-6d	0	± 1	± 35	± 96	± 72	± 42	± 57	± 53	± 30	± 28	± 32	± 30	± 29	± 29	± 28	± 24	± 22	± 23	± 24	± 25
10%-12d	0	96	370	602	883	1,095	1,337	1,448	1,558	1,623	1,727	1,806	1,879	1,954	2,012	2,083	2,143	2,174	2,213	2,241
	0	± 6	± 17	± 18	± 27	± 34	± 41	± 35	± 33	± 28	± 23	± 20	± 22	± 21	± 18	± 16	± 16	± 14	± 15	± 14
	0	96	412	576	845	1,092	1,299	1,408	1,545	1,615	1,713	1,791	1,860	1,933	1,994	2,070	2,132	2,164	2,204	2,231
	0	± 2	± 23	± 67	± 102	± 47	± 80	± 77	± 51	± 40	± 37	± 41	± 43	± 43	± 37	± 32	± 28	± 28	± 26	± 26

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.16

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 3)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
Control	0	66	109	125	142	152	163	184	200	216	229	254	277	291	309	330	349	361	375	386
		± 13	± 16	± 24	± 24	± 23	± 24	± 23	± 24	± 24	± 25	± 25	± 26	± 28	± 31	± 32	± 32	± 33	± 33	± 32
15%-3d	0	95	460	821	1,099	1,202	1,270	1,333	1,392	1,525	1,616	1,725	1,794	1,839	1,880	1,928	1,965	1,989	2,021	2,044
		± 3	± 34	± 46	± 29	± 23	± 19	± 18	± 17	± 14	± 59	± 63	± 65	± 64	± 66	± 66	± 66	± 67	± 68	± 68
15%-6d	0	89	484	813	1,093	1,202	1,272	1,334	1,419	1,593	1,699	1,798	1,864	1,913	1,956	2,002	2,041	2,065	2,095	2,115
		± 2	± 12	± 35	± 53	± 61	± 59	± 57	± 40	± 21	± 18	± 17	± 17	± 13	± 11	± 9	± 8	± 11	± 12	± 12
15%-12d	0	86	241	510	865	1,080	1,240	1,386	1,486	1,574	1,668	1,763	1,831	1,884	1,931	1,981	2,019	2,043	2,073	2,092
		± 3	± 29	± 20	± 52	± 69	± 68	± 57	± 47	± 27	± 26	± 36	± 35	± 29	± 21	± 12	± 9	± 5	± 5	± 4
5%-70C	0	82	412	791	1,063	1,167	1,233	1,297	1,385	1,534	1,627	1,715	1,779	1,827	1,864	1,909	1,945	1,968	1,997	2,018
		± 3	± 80	± 115	± 78	± 63	± 59	± 57	± 34	± 31	± 31	± 30	± 32	± 32	± 30	± 31	± 30	± 31	± 31	± 31

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.17

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 4)

ชุดทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																		
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่			
0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.9	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	18.9	21.9	23.9	26.9	29.9
Control	47	87	109	127	141	154	175	195	211	224	249	271	288	305	321	334	345	356	369
	± 20	± 20	± 20	± 21	± 22	± 22	± 22	± 23	± 22	± 21	± 21	± 22	± 21	± 21	± 21	± 24	± 25	± 26	± 27
5%-80C	74	500	844	1,038	1,108	1,240	1,414	1,520	1,588	1,641	1,724	1,788	1,851	1,919	1,971	2,005	2,026	2,052	2,075
	± 1	± 20	± 61	± 64	± 59	± 50	± 43	± 48	± 48	± 56	± 67	± 66	± 56	± 48	± 43	± 40	± 38	± 35	± 33
5%-90C	71	486	671	884	987	1,156	1,384	1,505	1,583	1,637	1,711	1,775	1,840	1,902	1,956	1,994	2,019	2,047	2,073
	± 1	± 33	± 49	± 40	± 30	± 17	± 16	± 14	± 20	± 25	± 30	± 34	± 32	± 17	± 6	± 3	± 1	± 2	± 6
10%-70C	88	604	853	1,008	1,077	1,214	1,384	1,482	1,550	1,595	1,661	1,725	1,802	1,874	1,929	1,964	1,987	2,015	2,038
	± 2	± 33	± 34	± 21	± 13	± 15	± 5	± 8	± 9	± 8	± 7	± 6	± 6	± 6	± 11	± 9	± 9	± 10	± 11
10%-80C	77	557	797	970	1,040	1,180	1,350	1,448	1,516	1,564	1,637	1,711	1,783	1,850	1,904	1,939	1,962	1,986	2,010
	± 1	± 36	± 33	± 12	± 9	± 19	± 8	± 3	± 6	± 7	± 5	± 3	± 4	± 7	± 7	± 6	± 5	± 4	± 4

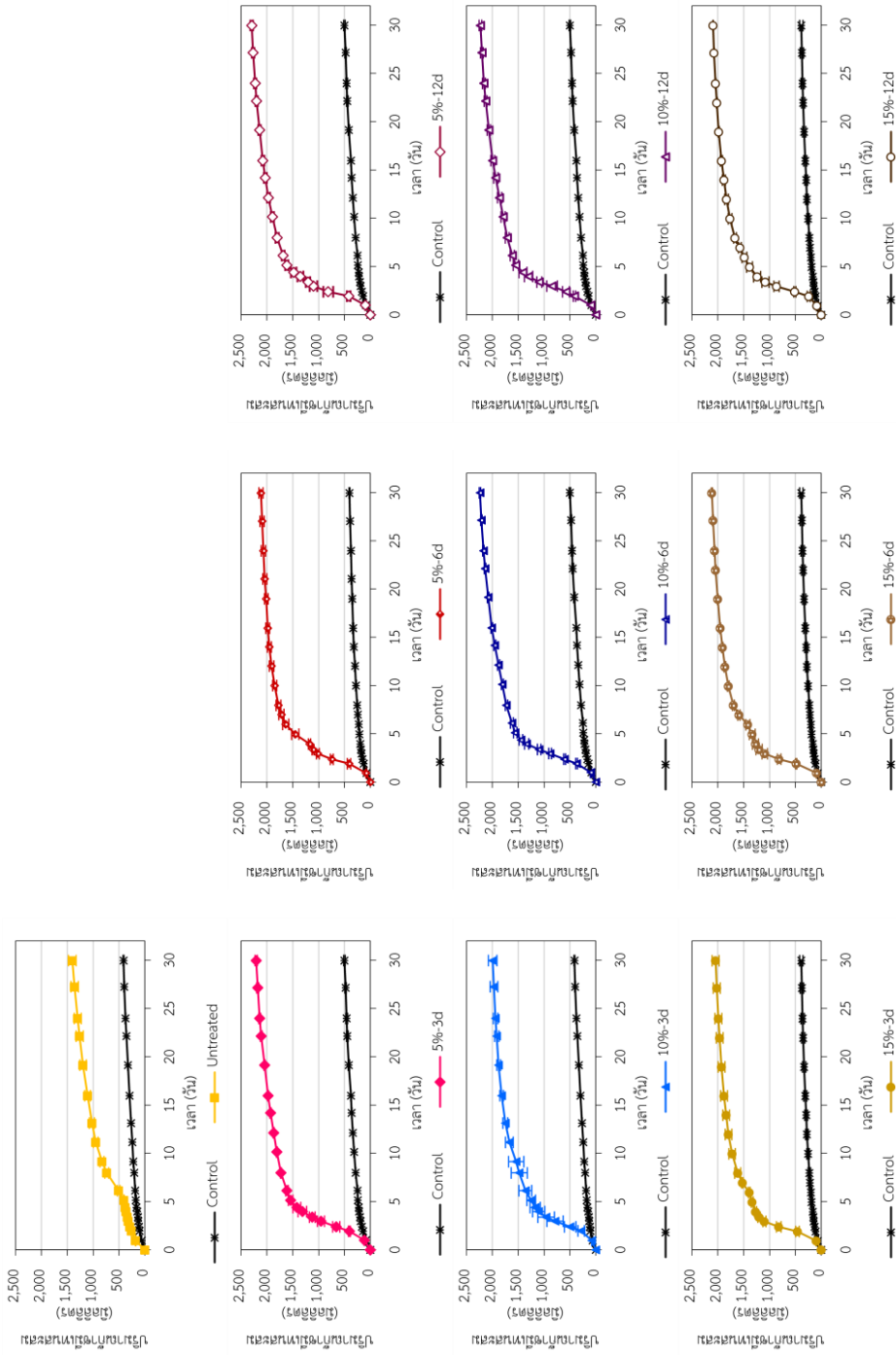
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.18

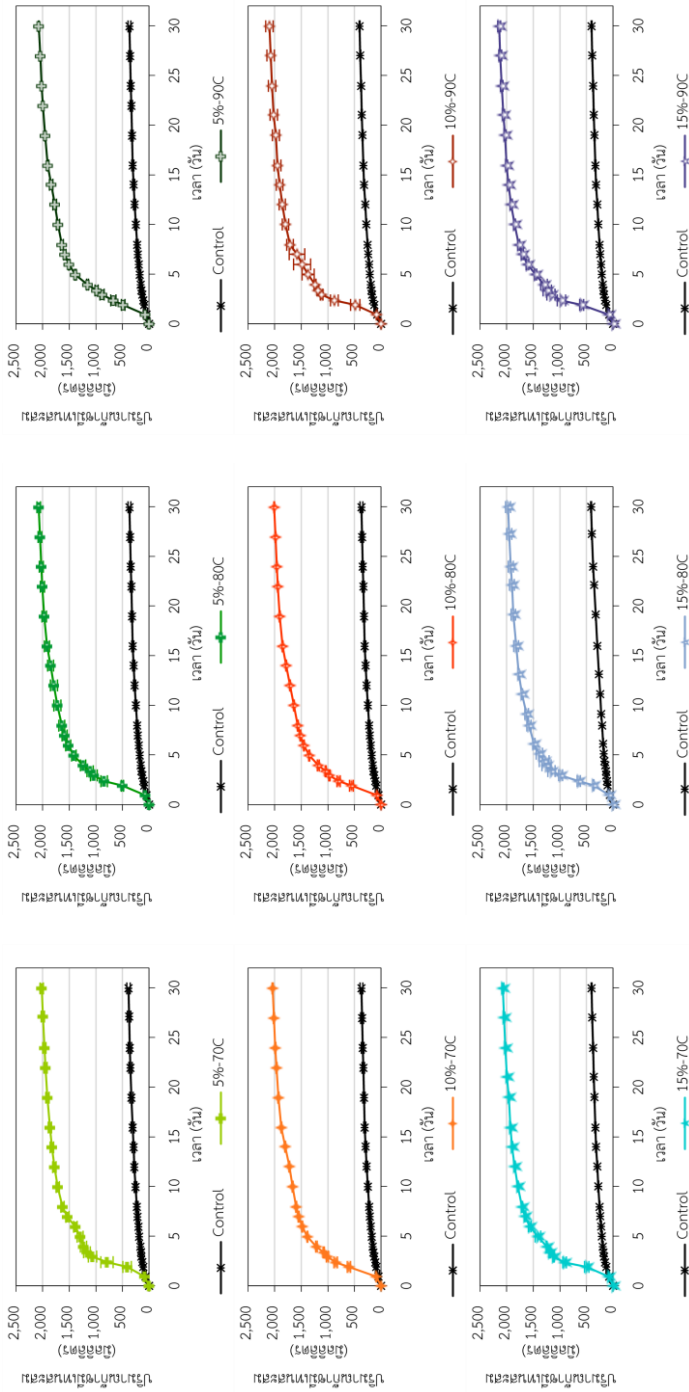
## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ชุดที่ 5)

ชุดทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	5.0	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	19.0	21.0	23.9	27.0	29.9	
Control	0	72	127	149	167	181	190	208	225	240	253	277	297	317	333	347	363	376	390	403
	± 2	± 6	± 8	± 10	± 12	± 7	± 8	± 9	± 8	± 8	± 8	± 10	± 9	± 11	± 12	± 10	± 11	± 9	± 9	± 9
5%-6d	0	83	412	744	1,015	1,108	1,175	1,452	1,637	1,720	1,777	1,849	1,910	1,953	1,985	2,013	2,041	2,069	2,094	2,115
	± 1	± 33	± 29	± 28	± 19	± 19	± 22	± 71	± 60	± 50	± 47	± 39	± 44	± 38	± 37	± 35	± 40	± 41	± 41	± 40
10%-90C	0	85	485	877	1,117	1,186	1,241	1,371	1,484	1,580	1,711	1,797	1,857	1,907	1,947	1,977	2,017	2,050	2,076	2,099
	± 1	± 87	± 73	± 25	± 17	± 18	± 18	± 114	± 161	± 146	± 62	± 60	± 59	± 62	± 65	± 66	± 70	± 70	± 70	± 70
15%-70C	0	85	495	911	1,118	1,190	1,247	1,412	1,565	1,654	1,710	1,788	1,848	1,897	1,932	1,962	1,997	2,026	2,048	2,072
	± 3	± 42	± 35	± 14	± 12	± 12	± 6	± 53	± 27	± 14	± 10	± 8	± 9	± 9	± 7	± 8	± 8	± 10	± 13	± 18
15%-90C	0	81	590	971	1,168	1,236	1,298	1,455	1,609	1,707	1,774	1,852	1,915	1,965	2,001	2,030	2,060	2,093	2,121	2,141
	± 4	± 37	± 78	± 76	± 78	± 78	± 62	± 20	± 26	± 18	± 18	± 17	± 21	± 18	± 18	± 18	± 18	± 24	± 27	± 27

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.23. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



ภาพที่ 4.23. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (ต่อ)

สำหรับปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากวัสดุตั้งต้นเพียงอย่างเดียว (ผลต่างระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของชุดทดลองและชุดควบคุม) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศด้วยวิธีบีเอ็มพี ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน แสดงดังตารางที่ 4.19 – 4.23 และภาพที่ 4.24

จากตารางที่ 4.19 – 4.23 และภาพที่ 4.24 จะเห็นว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพก่อให้เกิดปริมาณก๊าซมีเทนสะสมต่ำที่สุด (990 มิลลิลิตร) ส่วนการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ ก่อให้เกิดปริมาณก๊าซมีเทนสะสม 1,561 – 1,794 มิลลิลิตร โดยการย่อยสลายของฟางข้าว 5%-12d มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด (1,794 มิลลิลิตร) รองลงมาคือฟางข้าว 10%-6d (1,740 มิลลิลิตร) นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยภายในระยะเวลาประมาณ 4 วัน การย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่าง ๆ มีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด แต่การย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายถึง 8 วัน จึงมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับร้อยละ 50 ของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด

การย่อยสลายของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์แต่ละสภาวะซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและก่อให้เกิดก๊าซมีเทนเป็นปริมาณมากภายในระยะเวลาอันสั้นเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว ซึ่งฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสมากกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และมีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure, STP) คือ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.24 – 4.28 และภาพที่ 4.25 จะเห็นว่า การย่อยสลายของฟางข้าว 5%-12d มีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่สภาวะมาตรฐานสูงสุด รองลงมาคือการย่อยสลายฟางข้าว 10%-6d และ 15%-90C ตามลำดับ โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 1,602 1,554 และ 1,552 มิลลิลิตรมาตรฐาน ตามลำดับ ส่วนก๊าซมีเทนสะสมที่สภาวะมาตรฐานของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณต่ำที่สุดคือ 885 มิลลิลิตรมาตรฐาน



## ตารางที่ 4.19

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (เขตที่ 1)

ชนิด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																					
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน						
Untreated	0	± 3	± 2	± 3	± 3	± 3	± 4	± 4	4.0	4.4	5.1	6.1	8.0	9.1	11.1	13.1	16.0	19.1	22.1	24.0	27.3	30.0
10%-3d	0	± 1	± 63	± 112	± 157	± 160	± 118	± 100	± 100	1,012	1,077	1,177	1,273	1,315	1,430	1,487	1,527	1,550	1,562	1,565	1,571	1,583
15%-80C	0	± 5	± 10	± 31	± 37	± 68	± 86	± 92	± 105	1,135	1,213	1,302	1,374	1,400	1,472	1,513	1,527	1,547	1,548	1,548	1,553	1,561

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.20

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (เขตที่ 2)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																			
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน				
5%-3d	0	27 ± 7	265 ± 18	496 ± 69	771 ± 69	925 ± 55	1,099 ± 83	1,196 ± 77	1,300 ± 45	1,366 ± 25	1,447 ± 9	1,494 ± 8	1,532 ± 10	1,570 ± 11	1,603 ± 9	1,633 ± 10	1,665 ± 16	1,683 ± 19	1,701 ± 20	1,708 ± 23
5%-12d	0	10 ± 1	278 ± 35	651 ± 96	916 ± 72	1,007 ± 42	1,137 ± 57	1,258 ± 53	1,374 ± 30	1,438 ± 28	1,520 ± 32	1,580 ± 30	1,631 ± 29	1,671 ± 29	1,702 ± 28	1,729 ± 24	1,756 ± 22	1,772 ± 23	1,789 ± 24	1,794 ± 25
10%-6d	0	12 ± 6	230 ± 17	440 ± 18	699 ± 27	897 ± 34	1,122 ± 41	1,223 ± 35	1,315 ± 33	1,375 ± 28	1,445 ± 23	1,492 ± 20	1,542 ± 22	1,595 ± 21	1,636 ± 18	1,669 ± 16	1,699 ± 16	1,717 ± 14	1,735 ± 15	1,740 ± 14
10%-12d	0	10 ± 2	271 ± 23	414 ± 67	661 ± 102	894 ± 47	1,084 ± 80	1,183 ± 77	1,303 ± 51	1,368 ± 40	1,431 ± 37	1,477 ± 41	1,522 ± 43	1,573 ± 43	1,618 ± 37	1,656 ± 32	1,688 ± 28	1,707 ± 28	1,726 ± 26	1,731 ± 26

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.21

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (เขตที่ 3)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																		
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่					
15%-3d	0	29 ± 3	351 ± 34	696 ± 46	958 ± 29	1,049 ± 23	1,106 ± 19	1,150 ± 18	1,192 ± 17	1,309 ± 14	1,387 ± 59	1,471 ± 63	1,517 ± 65	1,548 ± 64	1,571 ± 66	1,598 ± 66	1,616 ± 66	1,628 ± 67	1,646 ± 68
15%-6d	0	23 ± 2	375 ± 12	688 ± 35	952 ± 53	1,049 ± 61	1,108 ± 59	1,151 ± 57	1,219 ± 40	1,378 ± 21	1,470 ± 18	1,544 ± 17	1,587 ± 17	1,622 ± 13	1,647 ± 11	1,673 ± 9	1,693 ± 8	1,704 ± 11	1,720 ± 12
15%-12d	0	20 ± 3	132 ± 29	386 ± 20	723 ± 52	927 ± 69	1,077 ± 68	1,203 ± 57	1,286 ± 47	1,358 ± 27	1,439 ± 26	1,509 ± 36	1,554 ± 35	1,593 ± 29	1,622 ± 21	1,651 ± 12	1,670 ± 9	1,682 ± 5	1,698 ± 5
5%-70C	0	16 ± 3	303 ± 80	666 ± 115	921 ± 78	1,015 ± 63	1,069 ± 59	1,113 ± 57	1,185 ± 34	1,318 ± 31	1,398 ± 31	1,462 ± 30	1,502 ± 32	1,536 ± 32	1,555 ± 30	1,579 ± 31	1,597 ± 30	1,607 ± 31	1,622 ± 31

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.22

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (เขตที่ 4)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																			
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน				
5%-80C	0	27 ± 1	413 ± 20	735 ± 61	911 ± 64	967 ± 59	1,086 ± 50	1,238 ± 43	1,325 ± 48	1,377 ± 48	1,417 ± 56	1,475 ± 67	1,517 ± 66	1,562 ± 56	1,614 ± 48	1,650 ± 43	1,671 ± 40	1,681 ± 38	1,696 ± 35	1,706 ± 33
5%-90C	0	24 ± 1	399 ± 33	562 ± 49	757 ± 40	846 ± 30	1,002 ± 17	1,209 ± 16	1,310 ± 14	1,372 ± 20	1,413 ± 25	1,462 ± 30	1,504 ± 34	1,551 ± 32	1,597 ± 17	1,635 ± 6	1,660 ± 3	1,674 ± 1	1,691 ± 2	1,705 ± 6
10%-70C	0	41 ± 2	516 ± 33	744 ± 34	881 ± 21	936 ± 13	1,060 ± 15	1,209 ± 5	1,287 ± 8	1,339 ± 9	1,371 ± 8	1,413 ± 7	1,454 ± 6	1,514 ± 6	1,568 ± 6	1,608 ± 11	1,630 ± 9	1,642 ± 9	1,658 ± 10	1,669 ± 11
10%-80C	0	30 ± 1	470 ± 36	688 ± 33	843 ± 12	899 ± 9	1,026 ± 19	1,175 ± 8	1,253 ± 3	1,305 ± 6	1,339 ± 7	1,388 ± 5	1,440 ± 3	1,495 ± 4	1,545 ± 7	1,583 ± 7	1,605 ± 6	1,617 ± 5	1,630 ± 4	1,642 ± 4

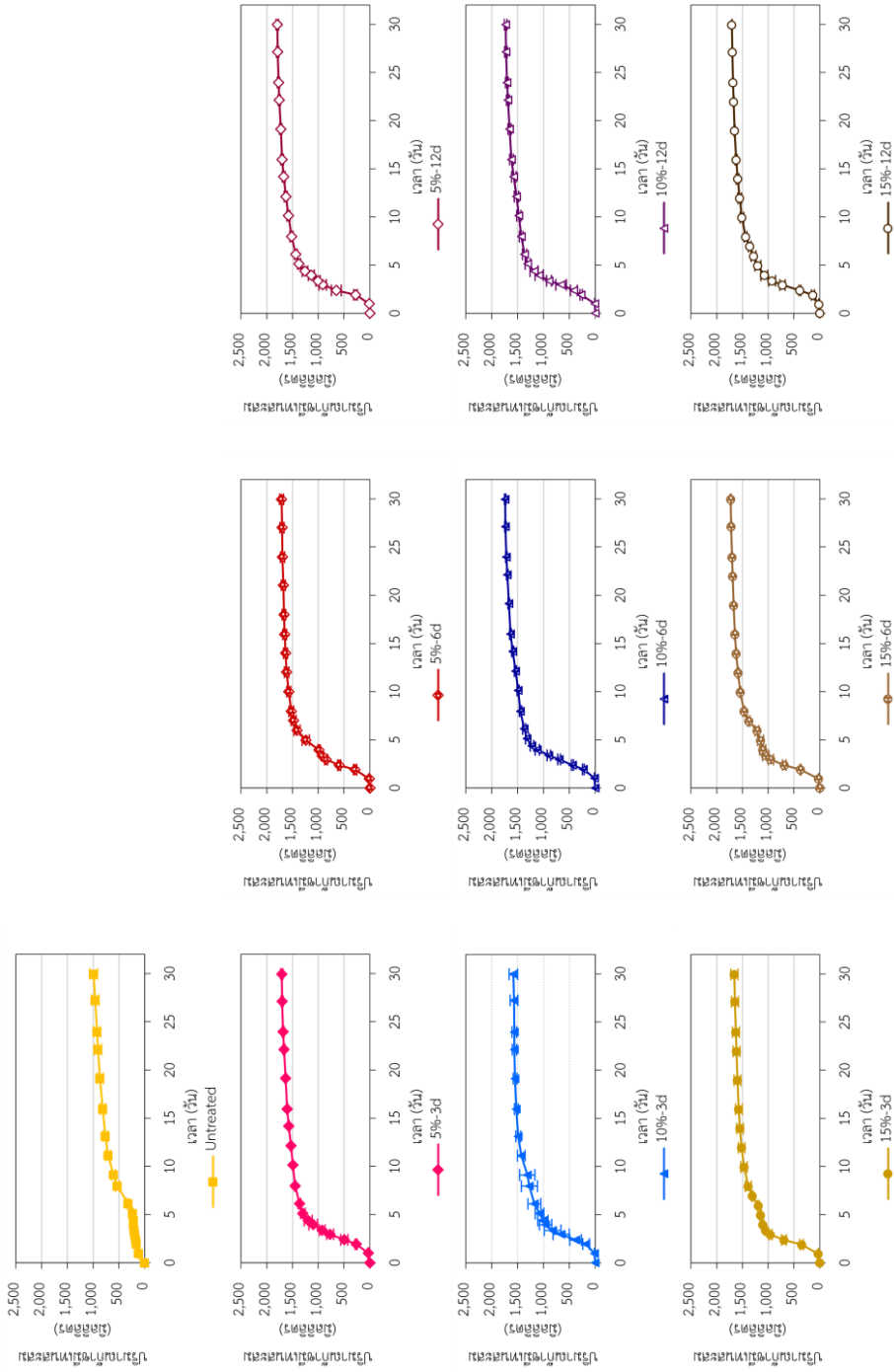
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.23

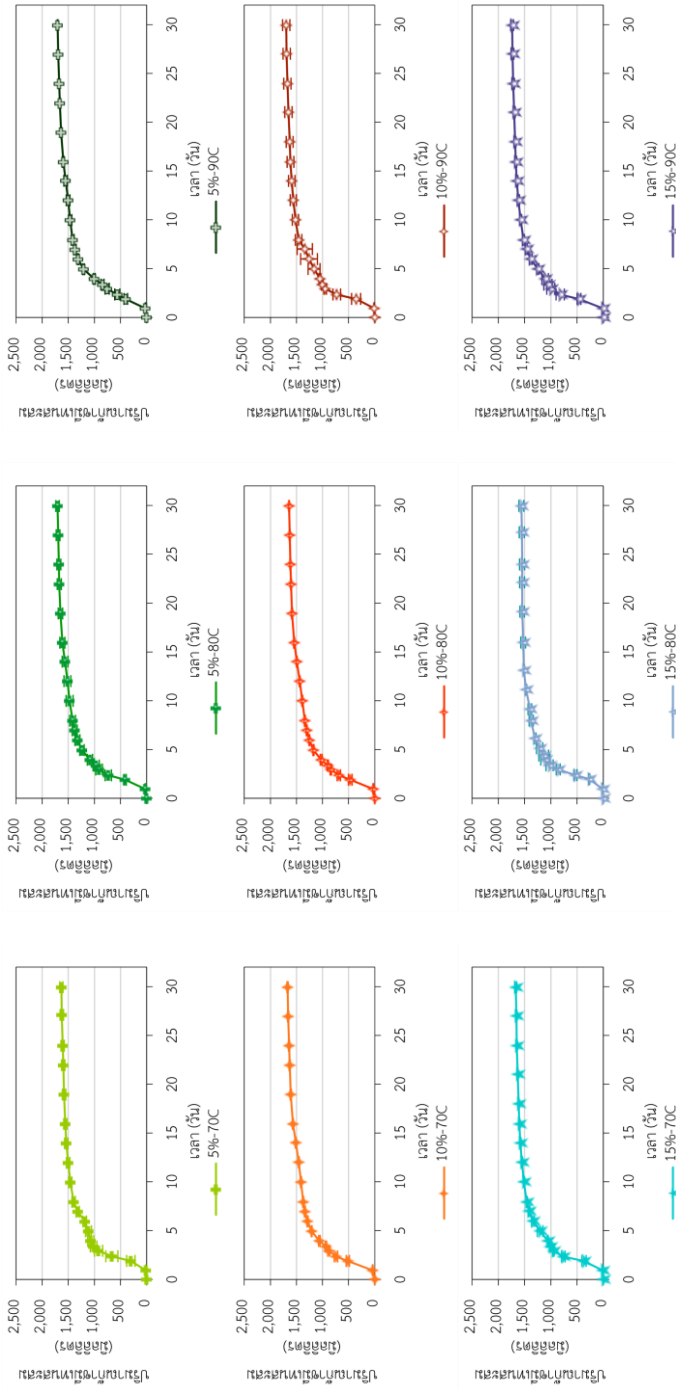
## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 3.5 องศาเซลเซียส (เขตที่ 5)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
5%-6d	0	11	285	595	848	927	986	1,244	1,412	1,481	1,524	1,572	1,613	1,635	1,653	1,666	1,678	1,693	1,705	1,712
		± 1	± 33	± 29	± 28	± 19	± 22	± 71	± 60	± 50	± 47	± 39	± 44	± 38	± 37	± 35	± 40	± 41	± 41	± 40
10%-90C	0	13	358	728	950	1,006	1,051	1,163	1,259	1,341	1,459	1,520	1,560	1,590	1,614	1,630	1,654	1,674	1,687	1,696
		± 1	± 87	± 73	± 25	± 17	± 18	± 114	± 161	± 146	± 62	± 60	± 59	± 62	± 65	± 66	± 70	± 70	± 70	± 70
15%-70C	0	13	368	762	951	1,010	1,058	1,204	1,340	1,415	1,458	1,511	1,551	1,580	1,599	1,615	1,634	1,650	1,659	1,669
		± 3	± 42	± 35	± 14	± 12	± 6	± 53	± 27	± 14	± 10	± 8	± 9	± 9	± 7	± 8	± 8	± 10	± 13	± 18
15%-90C	0	9	463	822	1,001	1,056	1,108	1,247	1,384	1,467	1,521	1,575	1,618	1,648	1,669	1,683	1,697	1,718	1,731	1,738
		± 4	± 37	± 78	± 76	± 78	± 62	± 20	± 26	± 18	± 18	± 17	± 21	± 18	± 18	± 18	± 18	± 24	± 27	± 27

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.24. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



ภาพที่ 4.24. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (ต่อ)

## ตารางที่ 4.24

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 1)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน				
Untreated	0	105	142	154	171	181	192	194	208	286	473	540	633	680	727	774	810	825	857	885
	± 3	± 3	± 2	± 3	± 3	± 3	± 4	± 4	± 6	± 22	± 33	± 35	± 40	± 44	± 49	± 56	± 62	± 61	± 64	± 66
10%-3d	0	14	160	339	589	736	857	904	962	1,052	1,137	1,174	1,277	1,328	1,364	1,384	1,395	1,397	1,403	1413
	± 1	± 56	± 100	± 140	± 140	± 143	± 105	± 89	± 75	± 111	± 139	± 131	± 67	± 42	± 31	± 32	± 37	± 40	± 66	± 74
15%-80C	0	13	240	474	767	914	987	1,014	1,083	1,163	1,227	1,250	1,314	1,351	1,364	1,382	1,382	1,383	1,387	1,395
	± 4	± 9	± 27	± 33	± 33	± 61	± 77	± 82	± 54	± 18	± 35	± 31	± 9	± 9	± 41	± 38	± 41	± 43	± 43	± 42

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



## ตารางที่ 4.25

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ถภาวมาตรฐาน (เขตที่ 2)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
5%-3d	0	24 ± 6	237 ± 16	443 ± 62	689 ± 62	826 ± 49	982 ± 74	1,069 ± 69	1,161 ± 40	1,220 ± 22	1,292 ± 8	1,334 ± 7	1,369 ± 9	1,403 ± 10	1,432 ± 8	1,458 ± 9	1,487 ± 15	1,503 ± 17	1,519 ± 18	1,526 ± 20
5%-12d	0	9 ± 1	248 ± 31	581 ± 85	818 ± 64	900 ± 37	1,015 ± 51	1,124 ± 47	1,227 ± 27	1,284 ± 25	1,358 ± 28	1,411 ± 27	1,457 ± 26	1,492 ± 26	1,520 ± 25	1,545 ± 21	1,568 ± 20	1,582 ± 21	1,598 ± 21	1,602 ± 22
10%-6d	0	11 ± 5	205 ± 15	393 ± 16	624 ± 24	801 ± 30	1,002 ± 36	1,092 ± 31	1,175 ± 30	1,228 ± 25	1,290 ± 20	1,332 ± 18	1,377 ± 19	1,425 ± 18	1,461 ± 16	1,491 ± 14	1,517 ± 14	1,534 ± 13	1,550 ± 13	1,554 ± 13
10%-12d	0	9 ± 2	242 ± 21	369 ± 60	590 ± 92	798 ± 42	968 ± 72	1,057 ± 69	1,164 ± 46	1,222 ± 36	1,278 ± 33	1,319 ± 36	1,360 ± 38	1,405 ± 38	1,445 ± 33	1,479 ± 28	1,507 ± 25	1,525 ± 25	1,541 ± 23	1,546 ± 23

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.26

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ถกภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 3)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
15%-3d	0	26 ± 3	313 ± 31	622 ± 41	855 ± 26	937 ± 21	988 ± 17	1,027 ± 16	1,065 ± 15	1,169 ± 13	1,239 ± 52	1,314 ± 56	1,355 ± 58	1,383 ± 57	1,403 ± 59	1,428 ± 59	1,443 ± 59	1,454 ± 60	1,470 ± 61	1,481 ± 61
15%-6d	0	20 ± 2	335 ± 11	615 ± 31	850 ± 47	937 ± 55	990 ± 53	1,028 ± 51	1,089 ± 36	1,230 ± 19	1,313 ± 16	1,379 ± 15	1,418 ± 15	1,449 ± 11	1,471 ± 10	1,494 ± 8	1,512 ± 7	1,522 ± 9	1,536 ± 11	1,544 ± 11
15%-12d	0	18 ± 3	118 ± 26	344 ± 17	646 ± 46	828 ± 61	962 ± 60	1,074 ± 51	1,149 ± 42	1,213 ± 24	1,285 ± 24	1,348 ± 32	1,388 ± 32	1,423 ± 26	1,449 ± 18	1,475 ± 11	1,492 ± 8	1,502 ± 5	1,517 ± 5	1,524 ± 4
5%-70C	0	14 ± 2	271 ± 71	595 ± 103	823 ± 70	907 ± 56	955 ± 52	994 ± 51	1,058 ± 30	1,177 ± 27	1,248 ± 27	1,305 ± 27	1,342 ± 28	1,372 ± 29	1,389 ± 26	1,411 ± 28	1,426 ± 26	1,435 ± 27	1,449 ± 27	1,458 ± 28

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.27

## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ถภาวมาตรฐาน (เขตที่ 4)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
5%-80C	0	24 ± 1	369 ± 18	656 ± 55	814 ± 57	864 ± 53	970 ± 44	1,106 ± 38	1,183 ± 43	1,230 ± 43	1,266 ± 50	1,317 ± 59	1,355 ± 59	1,395 ± 50	1,441 ± 43	1,474 ± 39	1,493 ± 35	1,501 ± 34	1,514 ± 31	1,524 ± 30
5%-90C	0	21 ± 1	356 ± 30	502 ± 43	676 ± 36	755 ± 26	895 ± 15	1,080 ± 14	1,170 ± 12	1,225 ± 18	1,262 ± 23	1,306 ± 27	1,343 ± 30	1,386 ± 29	1,426 ± 15	1,460 ± 5	1,483 ± 3	1,495 ± 1	1,510 ± 2	1,523 ± 5
10%-70C	0	36 ± 2	461 ± 29	664 ± 30	787 ± 19	836 ± 11	947 ± 13	1,080 ± 5	1,150 ± 7	1,196 ± 8	1,224 ± 7	1,262 ± 7	1,299 ± 5	1,352 ± 6	1,401 ± 5	1,436 ± 10	1,456 ± 8	1,467 ± 8	1,481 ± 9	1,491 ± 10
10%-80C	0	26 ± 1	419 ± 32	615 ± 29	753 ± 11	803 ± 8	916 ± 17	1,049 ± 7	1,119 ± 3	1,166 ± 5	1,196 ± 6	1,240 ± 4	1,286 ± 3	1,335 ± 4	1,380 ± 6	1,414 ± 6	1,434 ± 5	1,444 ± 5	1,456 ± 4	1,466 ± 3

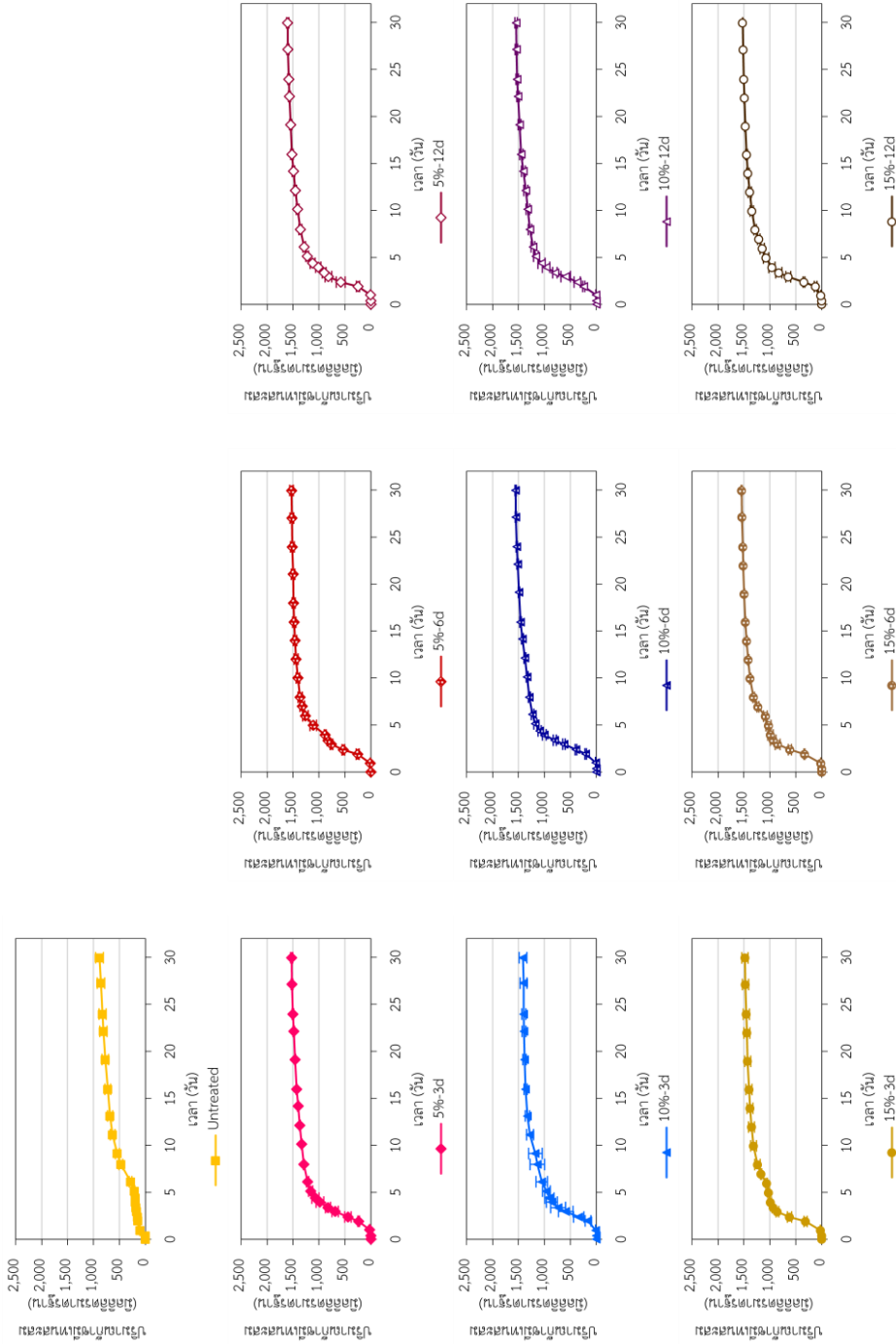
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.28

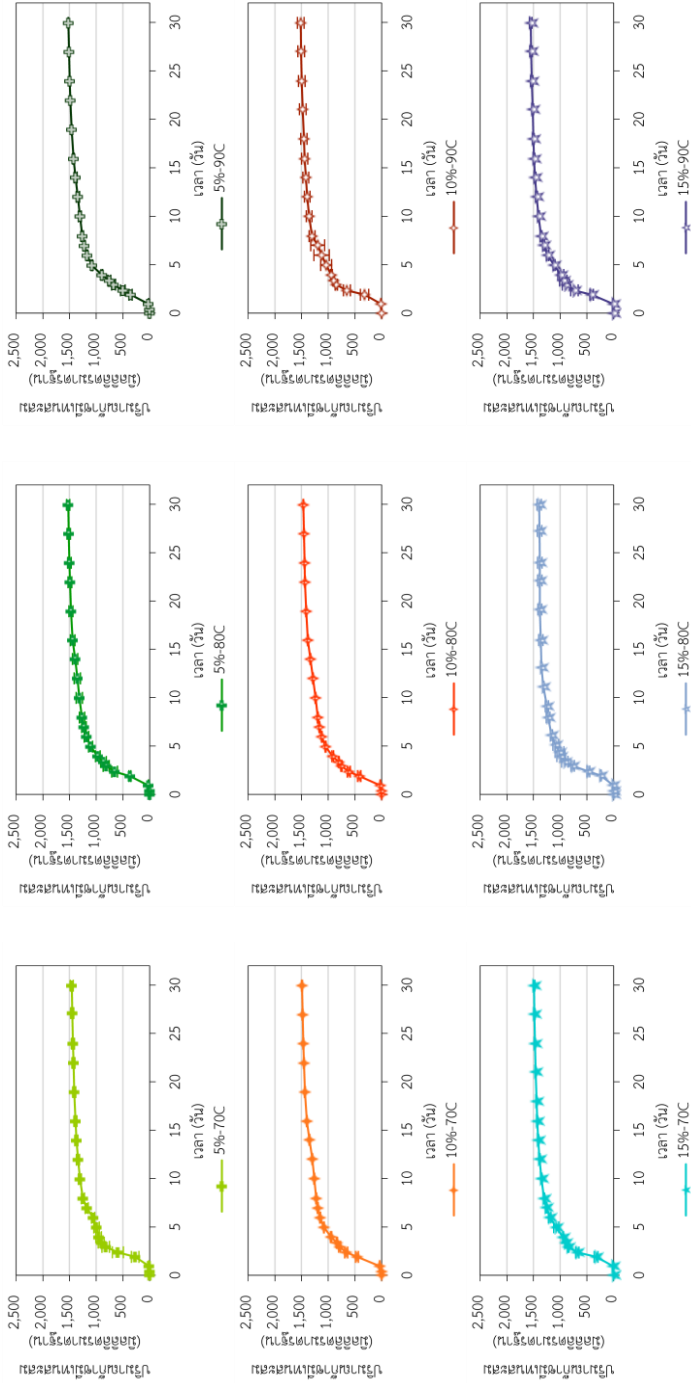
## ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ถภาวมาตรฐาน (เขตที่ 5)

ชุด การทดลอง	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																				
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน					
5%-6d	0	10	± 1	255	531	758	828	880	1,111	1,261	1,322	1,361	1,404	1,441	1,461	1,476	1,488	1,499	1,512	1,523	1,529
10%-90C	0	11	± 1	320	651	848	898	939	1,039	1,124	1,197	1,303	1,358	1,394	1,420	1,442	1,456	1,477	1,495	1,506	1,514
15%-70C	0	11	± 3	329	681	849	902	945	1,075	1,197	1,264	1,302	1,350	1,386	1,411	1,428	1,442	1,459	1,474	1,481	1,491
15%-90C	0	8	± 3	414	734	894	943	990	1,114	1,236	1,311	1,358	1,406	1,445	1,472	1,490	1,503	1,515	1,534	1,546	1,552

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.25. ปริมาณการมีแทนเนสสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน. (แสดงในรูปแบบของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



ภาพที่ 4.25. ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (ต่อ)

#### 4.5 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม (Cumulative methane yield) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายของฟางข้าวแบบไม่ใช้อากาศที่สภาวะมาตรฐาน (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย) ตามระยะเวลาการย่อยสลาย ดังแสดงในตารางที่ 4.29 – 4.33 และภาพที่ 4.26 – 4.27 จะเห็นว่า การย่อยสลายของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม 171 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Sträuber, Bühligen, Kleinstüber, Nikolausz, and Porsch (2015) ที่พบว่า การย่อยสลายฟางข้าวสาลีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น ภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน มีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม 183 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ ภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน พบว่ามีปริมาณสูงกว่าผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดจากการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ คือมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม 265 – 310 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยและผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยปริมาณผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของการย่อยสลายฟางข้าวที่สภาวะต่าง ๆ ภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4.28 จะเห็นว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ มีปริมาณผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมมากกว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีผลทำให้ฟางข้าวให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.29 – 4.33 และภาพที่ 4.28 ยังสังเกตเห็นว่า การย่อยสลายฟางข้าว 5%-12d ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุดคือ 310 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย รองลงมาคือฟางข้าว 5%-90C และฟางข้าว 5%-6d ซึ่งให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 305 และ 304 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยอื่น พบว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะนี้ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงกว่าในการศึกษาของ Song et al. (2014) ที่พบว่า การย่อยสลายฟางข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 8 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ซึ่งให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 35 วัน เท่ากับ 206 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย

ตารางที่ 4.29

ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 1)

ชุด การทดลอง	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแห้งระเหย)																						
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน							
Untreated	0	20	27	30	33	35	37	37	40	51	61	80	91	104	122	131	140	149	156	159	165	171	
		± 1	± 0	± 1	± 1	± 1	± 1	± 1	± 1	± 1	± 4	± 6	± 6	± 7	± 8	± 9	± 9	± 11	± 12	± 12	± 12	± 13	
10%-3d	0	3	32	67	116	145	169	178	189	207	224	231	252	262	269	273	275	275	275	275	276	278	
		± 0	± 11	± 20	± 28	± 28	± 21	± 18	± 15	± 22	± 27	± 26	± 13	± 8	± 6	± 6	± 6	± 6	± 7	± 8	± 8	± 13	± 15
15%-80C	0	3	46	90	146	174	188	193	206	221	233	238	250	257	259	263	263	263	263	263	264	265	
		± 1	± 2	± 5	± 6	± 12	± 15	± 16	± 10	± 3	± 7	± 6	± 2	± 2	± 8	± 7	± 8	± 8	± 8	± 8	± 8	± 8	

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน





## ตารางที่ 4.31

## ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 3)

ชุด การทดลอง	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรัมมาตรฐานต่อกรัมของแห้งทั้งหมด)																					
	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่								
15%-3d	0	5	± 1	61	121	167	183	193	193	201	208	228	242	257	265	270	274	279	282	284	287	289
15%-6d	0	4	± 0	65	120	165	182	192	192	200	212	239	255	268	276	282	286	290	294	296	299	300
15%-12d	0	3	± 1	23	68	128	165	191	191	213	228	241	255	268	276	283	288	293	296	298	301	303
5%-70C	0	3	± 0	53	116	160	176	186	193	206	229	243	243	254	261	267	270	274	277	279	282	284

หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## ตารางที่ 4.32

## ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 4)

ชุด การทดลอง	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย)																					
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน						
5%-80C	0	5	± 0	72	128	159	± 11	169	190	217	232	241	248	258	265	273	282	289	292	294	297	298
5%-90C	0	4	± 0	71	100	135	± 10	151	179	216	234	245	253	261	269	277	285	292	297	299	302	305
10%-70C	0	7	± 0	91	131	155	± 6	165	187	213	227	236	242	249	256	267	276	283	287	289	292	294
10%-80C	0	5	± 0	83	121	148	± 4	158	181	207	221	230	236	244	254	263	272	279	283	285	287	289

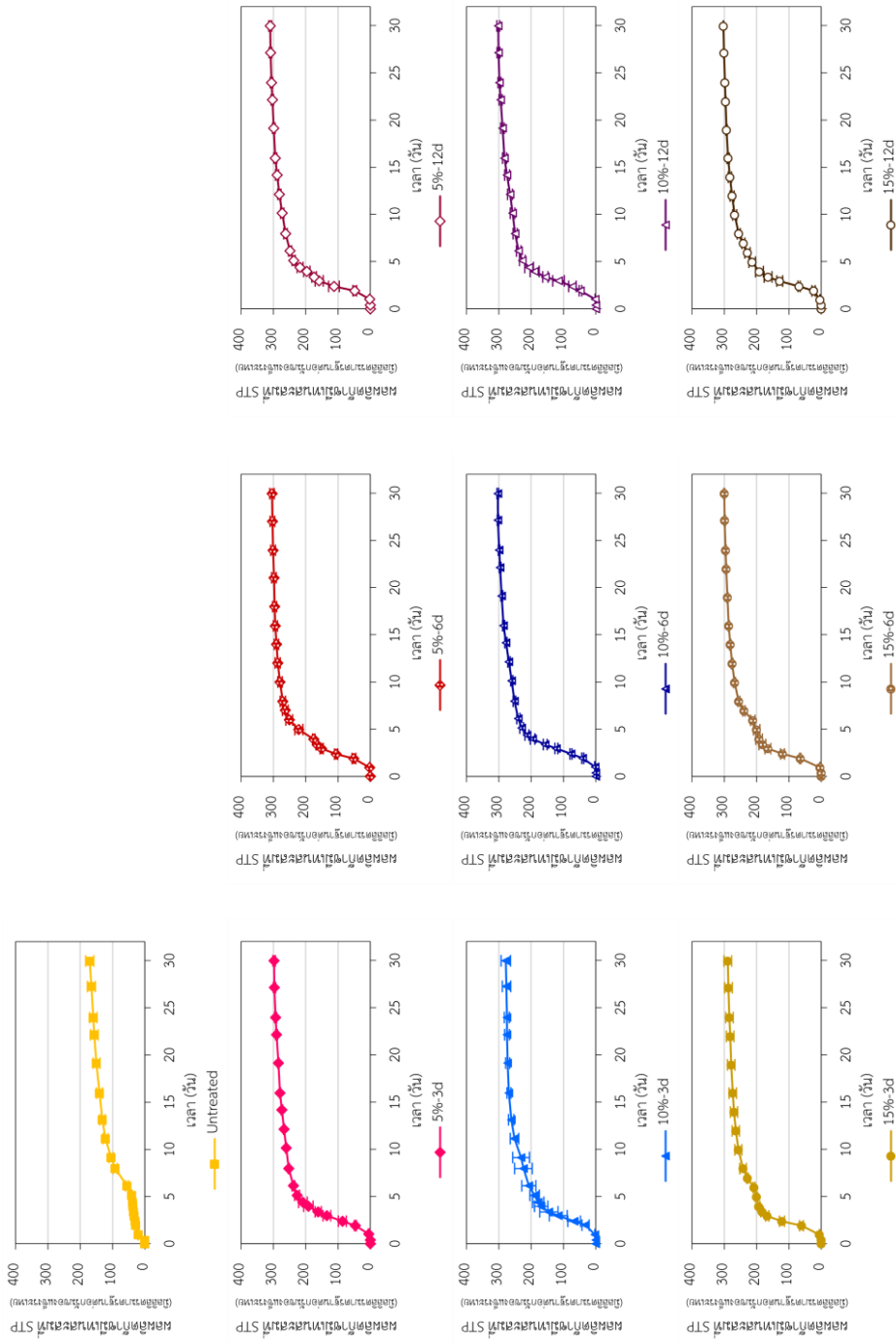
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.33

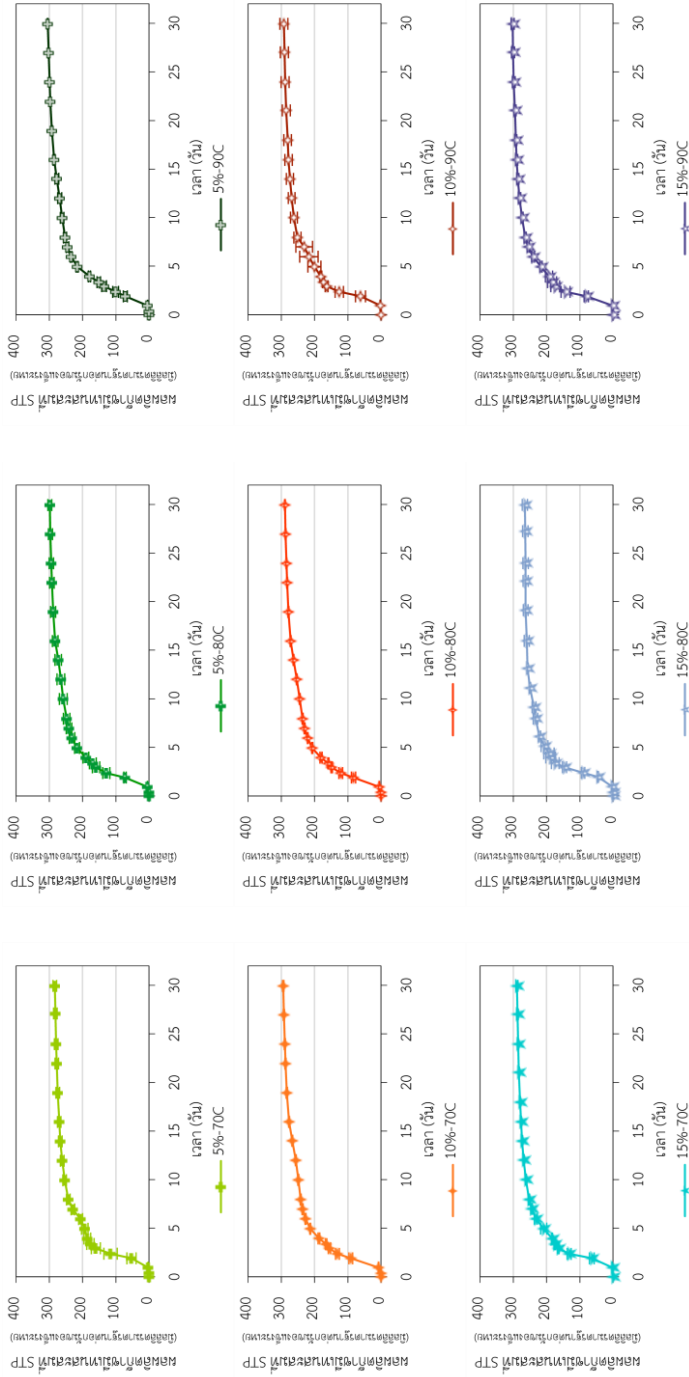
ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 5)

ชุด การทดลอง	ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มีลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย)																					
	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน	วันที่ วัน							
5%-6d	0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	5.0	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	19.0	21.0	23.9	27.0	29.9	304	
	0	± 0	± 6	± 5	± 5	± 3	± 4	± 13	± 11	± 9	± 8	± 7	± 8	± 7	± 7	± 6	± 7	± 7	± 7	± 7	± 7	± 7
10%-90C	0	± 0	± 15	± 13	± 4	± 3	± 3	± 20	± 28	± 25	± 11	± 10	± 10	± 11	± 11	± 11	± 12	± 12	± 12	± 12	± 12	± 12
15%-70C	0	± 1	± 7	± 6	± 2	± 2	± 1	± 9	± 5	± 2	± 2	± 1	± 2	± 2	± 1	± 1	± 1	± 1	± 2	± 2	± 2	± 3
15%-90C	0	± 1	± 6	± 14	± 13	± 14	± 11	± 3	± 4	± 3	± 3	± 3	± 4	± 3	± 3	± 3	± 3	± 3	± 4	± 4	± 5	± 5

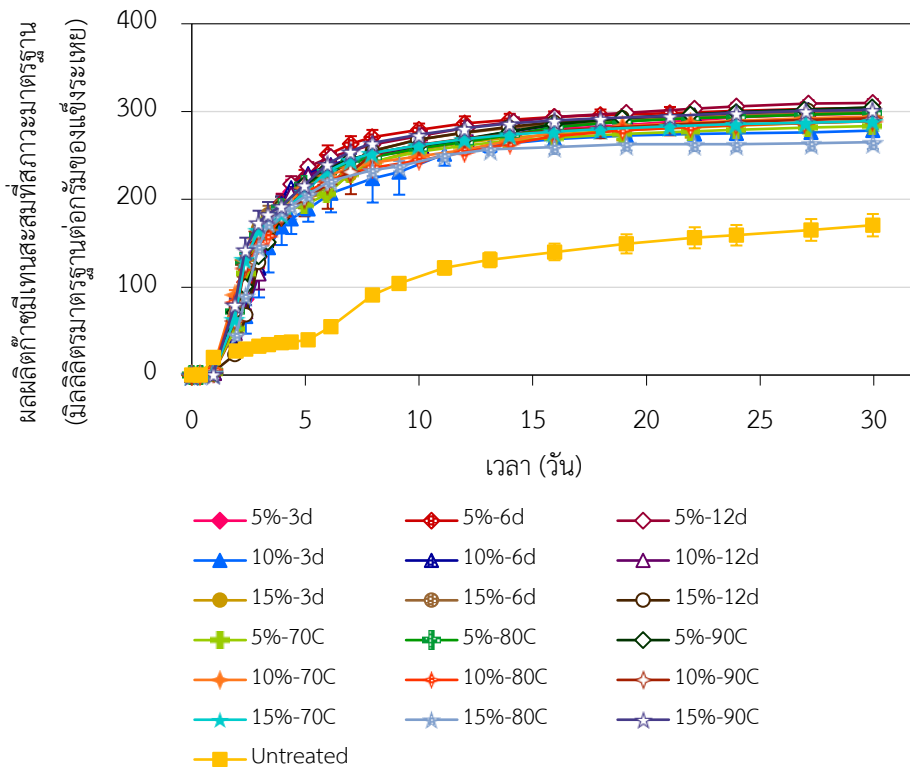
หมายเหตุ. ข้อมูลในตารางแสดงในรูปของ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



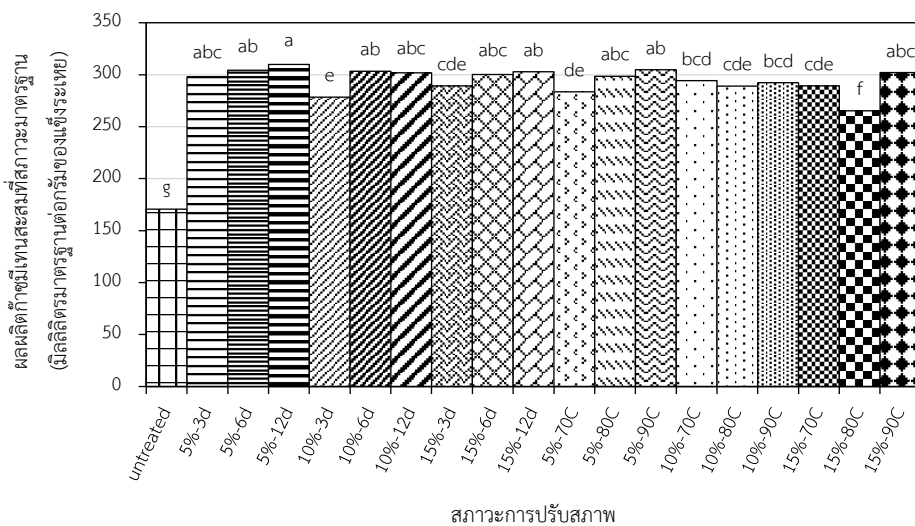
ภาพที่ 4.26. ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สามารถมาตรฐาน. (แสดงในรูปแบบของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



ภาพที่ 4.26. ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่มีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สามารถมาตรฐาน. (แสดงในรูปแบบของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (ต่อ)



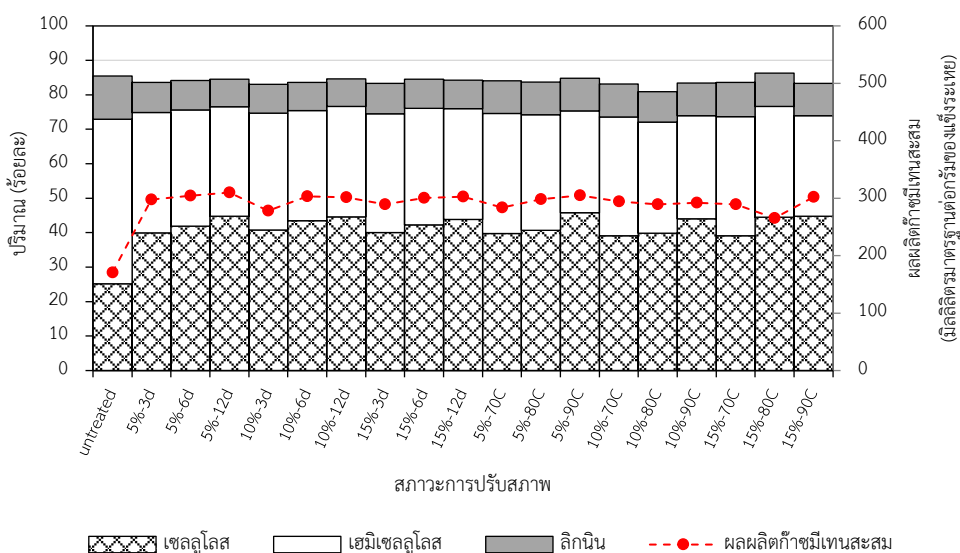
ภาพที่ 4.27. ผลผลิตก้าขมิแทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวที่สภาวะมาตรฐาน. (แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



ภาพที่ 4.28. ผลผลิตก้าขมิแทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน.

หมายเหตุ. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันบนปลายแท่งกราฟแต่ละแท่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ตามวิธี Duncan's multiple-range test

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.29 – 4.33 และภาพที่ 4.28 จะสังเกตเห็นว่า การปรับสภาพด้วย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 54.97 – 81.29 เมื่อเปรียบเทียบกับการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีองค์ประกอบทางเคมีกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป โดยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์แต่ละสภาวะมีปริมาณของเซลลูโลสที่สูงขึ้น มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ลดลง โดยจะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างฟางข้าวที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงกว่าจะมีผลผลิตก๊าซมีเทนที่มากกว่าดังภาพที่ 4.29 นอกจากนี้การปรับสภาพยังช่วยลดระดับความเป็นผลึกของเซลลูโลส ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซมีเทน ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายดังกล่าวเกิดได้อย่างรวดเร็วและมีปริมาณก๊าซมีเทนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



ภาพที่ 4.29. การเปรียบเทียบปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ กับผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน.

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่สภาวะมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 4.28 จะเห็นว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นเดียวกันที่มีระยะเวลาการปรับสภาพนานกว่าจะให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงกว่า จึงสามารถกล่าวได้ว่าระยะเวลาของการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟางข้าวให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเพิ่มขึ้น และพบว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพสูงขึ้นจะให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงขึ้นตามไปด้วย แต่การย่อยสลาย



ฟางข้าวที่ผ่านปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพสูงขึ้นไม่ได้ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่สูงขึ้นตามไปด้วย จึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพฟางข้าวที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำ (ร้อยละ 5) ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ฟางข้าวให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่ระยะเวลาการปรับสภาพเท่ากัน หรือที่ระดับอุณหภูมิของการปรับสภาพเดียวกัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม

#### 4.6 จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าว

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ ได้ผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของฟางข้าวแต่ละสภาวะ ซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นเส้นถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรงร่วมกับผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของฟางข้าวภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ได้ดังภาพที่ 4.30 ส่วนพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายฟางข้าวแต่ละสภาวะ ตลอดจนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) และค่าความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ และผลการทำนาย (% Error) ของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวแต่ละสภาวะ มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.34

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.30 จะเห็นว่า เส้นถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรงที่ได้จากการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ โดยใช้สมการ Modified Gompertz มีความเหมาะสม (Good fits) กับผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ ดังกล่าว โดยผลที่ได้จากการทำนายสามารถอธิบายผลที่ได้จากการวิเคราะห์ได้ร้อยละ 96 – 99 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของฟางข้าวแต่ละสภาวะตลอดระยะเวลา 30 วัน ( $B_e$ ) กับผลการทำนาย ( $B_0$ ) จะเห็นว่า มีความแตกต่างกันน้อยมาก กล่าวคือ มีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 7

เมื่อพิจารณาผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ( $B_0$ ) ของการย่อยสลายฟางข้าวแต่ละสภาวะดังแสดงในตารางที่ 4.34 จะเห็นว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมน้อยที่สุด คือ 167 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ส่วนการย่อยสลายฟางข้าว

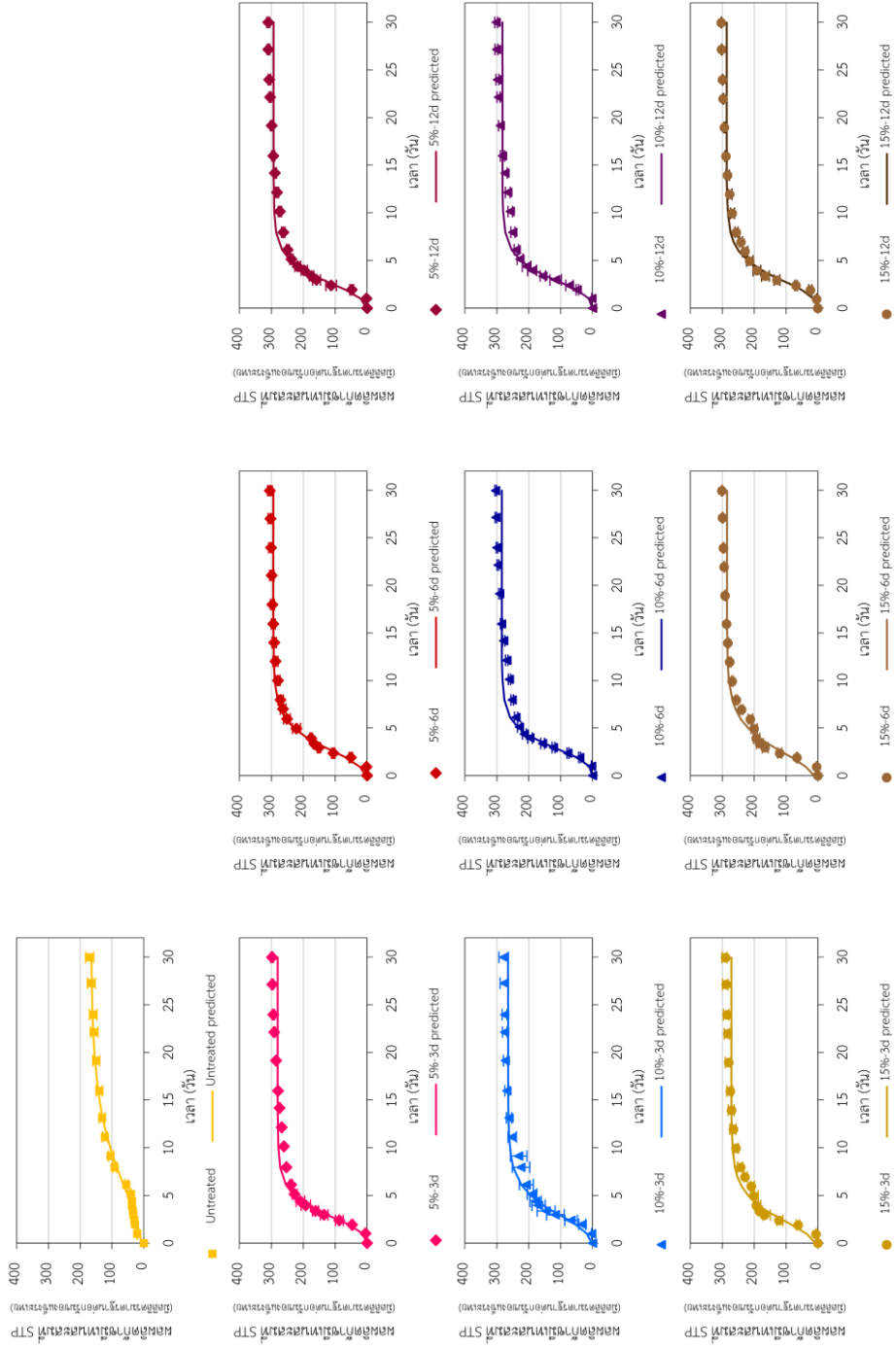
ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ มีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมอยู่ระหว่าง 254 – 293 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ซึ่งจะเห็นว่าผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณมากกว่าผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึงร้อยละ 52 – 75 ผลการทำนายแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยส่งเสริมให้กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยจากการทำนายพบว่า การย่อยสลายฟางข้าว 5%-6d และ 5%-12d ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมมากที่สุดคือ 293 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย รองลงมาคือการย่อยสลายฟางข้าว 5%-90C และการย่อยสลายฟางข้าว 15%-90C ซึ่งให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 287 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.29 จะสังเกตเห็นว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่มีระยะเวลาการปรับสภาพนานกว่าจะให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมมากกว่า จึงสามารถกล่าวได้ว่า ระยะเวลาการปรับสภาพที่ยาวนานขึ้นมีผลทำให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะ 5%-6d 5%-12d 10%-6d 10%-12d 15%-6d และ 15%-12d พบว่า มีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ในการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อาจไม่มีความจำเป็นต้องใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีระดับความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 5 และไม่จำเป็นต้องปรับสภาพยาวนานถึง 12 วัน

เมื่อพิจารณาผลการทำนายอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ( $\mu_m$ ) พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเพียง 11.7 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Ferreira, Nilsen, Fdz-Polanco, and Pérez-Elvira (2014) และ Moset, Al-zohairi, and Møller (2015) ที่พบว่าฟางข้าวสาลีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 16.1 และ 17.24 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สภาวะต่าง ๆ พบว่า มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดอยู่ในช่วง 50.5 – 72.4 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน โดยฟางข้าว 10%-6d และ 5%-12d มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดมากที่สุด คือ 72.4 และ 70.2 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาระยะพัก ( $\lambda$ ) ของการย่อยสลายฟางข้าว ดังแสดงในตารางที่ 4.34 จะสังเกตว่าในการย่อยสลายฟางข้าวทุกสภาวะมีระยะพักหรือระยะที่จุลินทรีย์ปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดก๊าซมีเทนค่อนข้างน้อยในระยะเริ่มต้นของการย่อยสลาย โดยการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีระยะพัก 0.6 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Ferreira

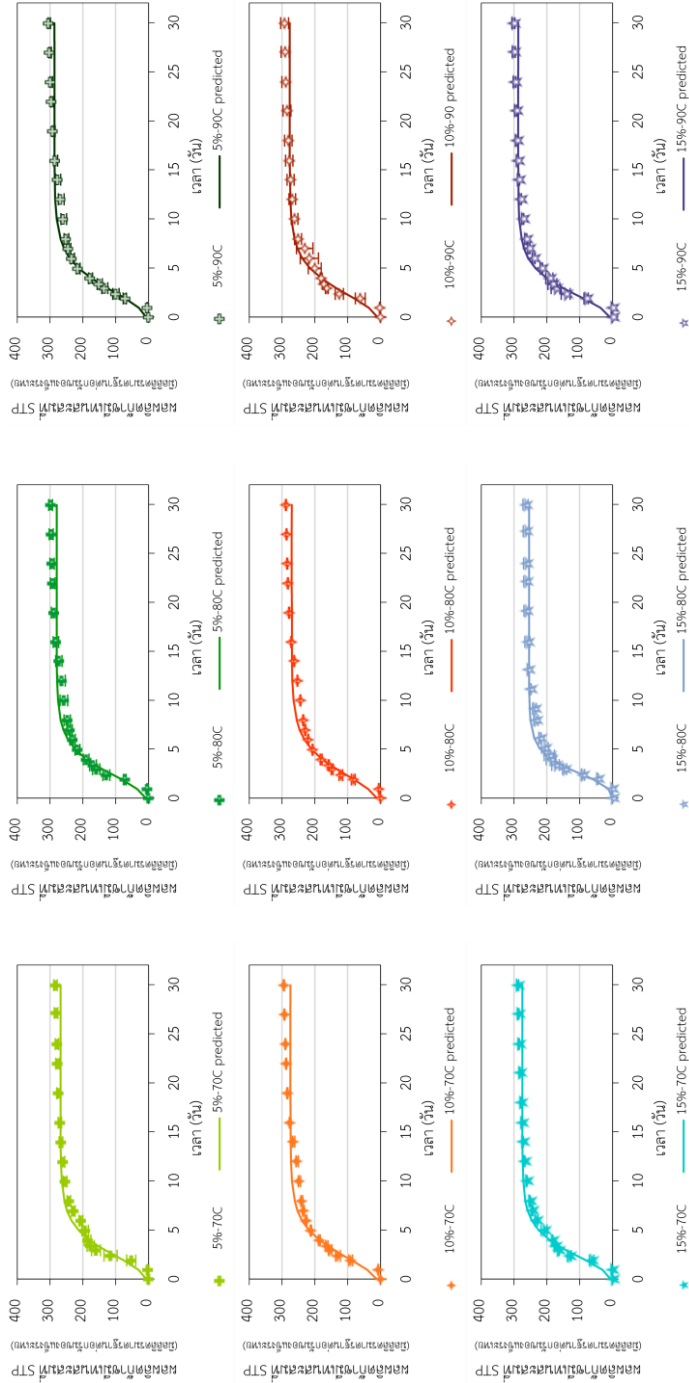
et al. (2014) ที่พบว่าฟางข้าวสาลีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีมีระยะพัก 0.8 แต่เป็นระยะเวลาที่ยาวนานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Moset et al. (2015) ที่พบว่าฟางข้าวสาลีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีมีระยะพักเพียง 0.19 วัน และเมื่อพิจารณาการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องส่วนใหญ่มีระยะพักค่อนข้างสั้นคือ 0.3 – 0.6 วัน ยกเว้นการย่อยสลายฟางข้าว 15%-80C ที่มีระยะพัก 1.1 วัน ส่วนการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้องมีระยะพัก 0.9 – 1.3 วัน ซึ่งยาวนานกว่าระยะพักในการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ยกเว้นการย่อยสลายฟางข้าว 15%-3d และฟางข้าว 15%-6d แสดงให้เห็นว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้องส่วนใหญ่เกิดการย่อยสลายในระยะเริ่มต้น ซ้ำกว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง





ภาพที่ 4.30. การเปรียบเทียบประหว่งผลการวิเคราะห์และผลการทำนายของผลิตภัณฑ์ที่ไม่เหมาะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 30 วัน ที่สถานะมาตรฐาน.

(แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



ภาพที่ 4.30. การเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทำนายของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวสภาวะต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 30 วัน ที่สถานะมาตรฐาน.

(แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและแถบข้อผิดพลาดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (ต่อ)

## ตารางที่ 4.34

พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายฟางข้าวที่สภาวะมาตรฐานโดยใช้สมการ Modified Gompertz

วัสดุตั้งต้น	$B_e$ (NmL gVS <sup>-1</sup> )	$B_0$ (NmL gVS <sup>-1</sup> )	$H_m$ (NmL gVS <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (days)	R <sup>2</sup>	%Error $B_e$ and $B_0$
Untreated	171 ± 13	167	11.7	0.6	0.989	2.26
5%-3d	298 ± 4	280	68.9	1.1	0.987	6.03
5%-6d	304 ± 7	293	62.3	0.9	0.990	3.57
5%-12d	310 ± 4	293	70.2	1.0	0.982	5.56
10%-3d	278 ± 15	265	52.4	1.0	0.978	4.91
10%-6d	303 ± 2	284	72.4	1.3	0.984	6.41
10%-12d	302 ± 4	282	68.8	1.2	0.984	6.49
15%-3d	289 ± 12	271	55.9	0.5	0.961	6.25
15%-6d	300 ± 2	285	52.6	0.4	0.967	5.14
15%-12d	303 ± 1	286	64.8	1.2	0.980	5.64
5%-70C	284 ± 5	268	54.9	0.5	0.966	5.51
5%-80C	298 ± 6	280	56.9	0.5	0.973	6.26
5%-90C	305 ± 1	287	53.2	0.6	0.985	5.86
10%-70C	294 ± 2	274	52.9	0.3	0.970	6.73
10%-80C	289 ± 1	270	50.5	0.3	0.972	6.42
10%-90C	292 ± 12	277	53.1	0.4	0.968	5.30
15%-70C	289 ± 3	275	60.2	0.6	0.976	4.95
15%-80C	265 ± 8	254	69.7	1.1	0.983	4.15
15%-90C	302 ± 5	287	61.1	0.5	0.974	4.89

หมายเหตุ.  $B_e$  = ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการวิเคราะห์การย่อยสลายของฟางข้าวตลอดระยะเวลา 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน

$B_0$  = ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทำนายการย่อยสลายของฟางข้าวตลอดระยะเวลา 30 วัน ที่สภาวะมาตรฐาน

NmL = มิลลิลิตรมาตรฐาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตก๊าซมีเทนโดยการศึกษาระดับทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าว ปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศศึกษากายภาพการผลิตก๊าซมีเทน และจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งทำการศึกษาในฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา และอุณหภูมิ ของการปรับสภาพที่แตกต่างกันจำนวน 18 สภาวะ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลค่อนข้างน้อยต่อปริมาณของแฉ่งรวม ปริมาณซีโอดี และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฟางข้าว แต่ส่งผลต่อปริมาณของแฉ่งระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวม และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ฟางข้าวมีปริมาณของแฉ่งระเหย ปริมาณไนโตรเจนรวม และปริมาณฟอสฟอรัสรวมลดลง แต่ส่งผลให้ฟางข้าวมีปริมาณเถ้า และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

2. องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว พบว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเซลลูโลส และส่งผลต่อการลดลงของปริมาณลิกนิน และปริมาณเฮมิเซลลูโลส โดยระยะเวลาและอุณหภูมิของการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟางข้าวมีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น แต่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง ส่วนระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพมีผลค่อนข้างน้อยต่อปริมาณเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส และปริมาณลิกนิน

3. ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ

ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ มีลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของมัดเส้นใยแตกต่างจากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างเห็นได้ชัด โดยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ มีลักษณะพื้นผิวที่สะอาดและปราศจากพื้นผิวภายนอกที่ประกอบด้วยชั้นของน้ำมัน ไข สารแทรก ซิลิกา และสิ่งเจือปนอื่น ๆ และสังเกตเห็นลักษณะมัดของเส้นใยที่ชัดเจน และมีรูพรุนมากขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นเซลล์พาราเควไคมาได้ชัดเจนมากขึ้น

4. การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว

การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวในชุดทดลองต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณความเป็นด่าง ปริมาณกรดไขมันระเหย ผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน ปริมาณซีโอดีละลาย ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณของแข็งคงตัว พบว่ากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวในทุกชุดทดลองอยู่ในสภาวะที่สมดุลและมีเสถียรภาพดีตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดของแข็งระเหยได้มากกว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ฟางข้าวสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ง่ายขึ้น

5. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี

จากการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของฟางข้าวด้วยวิธีบีเอ็มพี พบว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 18 สภาวะ เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และพบว่าภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมมากกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพถึงร้อยละ 54.97 – 81.29 โดยฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเพียง 171 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ส่วนการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมอยู่ในช่วง 265 – 310 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย

นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาของการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟางข้าวให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมเพิ่มขึ้น และการปรับสภาพฟางข้าวที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำ



(ร้อยละ 5) ที่มีอุณหภูมิของการปรับสภาพเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ฟางข้าวให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้น แต่การปรับสภาพฟางข้าวที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น (ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10) ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ซึ่งไม่สอดคล้องกับสมมติฐานของการศึกษาที่ว่า ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นหรือที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ฟางข้าวมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงขึ้นตามไปด้วย

#### 6. พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว

จากการใช้สมการ Modified Gompertz ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ภายในระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน พบว่า สมการ Modified Gompertz มีความเหมาะสมกับผลการวิเคราะห์ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทดลอง โดยผลที่ได้จากการทำนายสามารถอธิบายผลที่ได้จากการวิเคราะห์ที่ร้อยละ 96 – 99 สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทนประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทำนาย อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด และระยะพัก โดยมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมจากการทำนาย พบว่า ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทำนายกับผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกันมาก โดยผลจากการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมพบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม 167 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ส่วนฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมอยู่ระหว่าง 254 – 293 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย

สำหรับอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด พบว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 11.7 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน ซึ่งเป็นปริมาณน้อยกว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ที่มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดอยู่ระหว่าง 50.5 – 72.4 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน โดยฟางข้าว 10%-6d มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือฟางข้าว 5%-12d ซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 72.4 และ 70.2 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย-วัน ตามลำดับ

ส่วนระยะพักของการย่อยสลายฟางข้าว พบว่าการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ ทุกสภาวะมีระยะพัก โดยการย่อยสลายฟางข้าวที่ไม่ผ่านปรับสภาพมีระยะพัก 0.6 วัน ส่วนการ

ย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ มีระยะพักอยู่ระหว่าง 0.3 – 1.2 วัน

7. ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา และอุณหภูมิการปรับสภาพฟางข้าวที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทน

จากการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะการปรับสภาพต่าง ๆ ทั้ง 18 สภาวะ พบว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุดคือ 310 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำนายผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซมีเทน ที่พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมจากการทำนายสูงที่สุดคือ 293 มิลลิลิตรมาตรฐานต่อกรัมของแข็งระเหย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสภาวะการปรับสภาพฟางข้าวที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศคือ ระดับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ระยะเวลาการปรับสภาพ 12 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาปริมาณฟางข้าวที่สูญเสียไปในขั้นตอนการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อพิจารณาผลผลิตของฟางข้าวที่ได้หลังจากการปรับสภาพ (Pretreatment yield) ซึ่งทำให้ทราบถึงปริมาณฟางข้าวตั้งต้นที่ต้องนำมาปรับสภาพเพื่อให้ได้ปริมาณฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพตามที่ต้องการ และพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการดำเนินงาน

2. ควรมีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เพื่อหาสภาวะการปรับสภาพฟางข้าวที่เหมาะสมที่สุด โดยเลือกปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุด (Screening design) และทำการทดลองบางส่วน (Fraction) ซึ่งเป็นการลดระยะเวลาและงบประมาณในการวิเคราะห์ จากนั้นทำการทดลองตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ แล้วสร้างเป็นสมการทางสถิติซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบประมาณการระหว่างปัจจัยต่าง ๆ (ตัวแปรอิสระ) กับตัวแปรตอบสนอง (ตัวแปรตาม) ซึ่งช่วยค้นหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimize) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

3. ควรมีการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 5 เนื่องจากผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้พบว่า การย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมตลอดระยะเวลาการย่อยสลาย 30 วัน ใกล้เคียงกันกับการย่อยสลายฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 จึงกล่าวได้

ว่า การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 5 ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม ดังนั้นหากทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 5 จะทำให้ทราบระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมและคุ้มทุนต่อการนำไปใช้จริง



## รายการอ้างอิง

- เกษมศรี ชับซ้อน. (2541). ปฐพีวิทยา. กรุงเทพฯ: นานาส์สิ่งพิมพ์.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. Retrieved from [http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html)
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2554). พลังงานทดแทน. Retrieved from <http://www3.egat.co.th/re/>
- พัชรี แสงจันทร์. (2554). ภาวะโลกร้อนกับงานวิจัยในนาข้าว. *แก่นเกษตร*, 39, 1-4.
- พันธ์ทิพย์ กล่อมแจ็ก, & ปฐมพร น้อยจันทร์. (2561). การศึกษาคุณภาพของปุ๋ยหมักจากการหมักร่วมระหว่างฟางข้าวและน้ำเสียฟาร์มสุกร. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 37(5), 647-658.
- รัชพล พะวงค์รัตน์. (2558). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. *Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2(1), 143-157.
- สมชัย บวรกิตติ. (2558). เมื่อโลกร้อนขึ้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์กรุงเทพเวชสาร.
- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2553). รายงานฉบับสมบูรณ์ การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย (รายงานแห่งชาติฉบับที่ 2). Retrieved from กรุงเทพฯ: <https://wedocs.unep.org/rest/bitstreams/16029/retrieve>
- อรุณี ศุภสินสาธิต. (2555). พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 16(2), 36-43.
- Amirta, R., Tanabe, T., Watanabe, T., Honda, Y., Kuwahara, M., & Watanabe, T. (2006). Methane fermentation of Japanese cedar wood pretreated with a white rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*. *Journal of Biotechnology*, 123, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2005.10.004>
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., . . . 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>
- Asam, Z.-u.-Z., Poulsen, T. G., Nizami, A.-S., Rafique, R., Kiely, G., & Murphy, J. D. (2011). How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas

- plants? *Applied Energy*, 88(6), 2013-2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.036>
- ASTM International. (2006). *ASTM standard related to environmental*. West Conshohocken. Pennsylvania: ASTM International.
- Ayeni, A. O., Adeeyo, O. A., Oresgun, O. M., & Oladimeji, T. E. (2015). Compositional analysis of lignocellulosic materials: Evaluation of an economically viable method suitable for woody and non-woody biomass. *American Journal of Engineering Research*, 4(4), 14-19.
- Ayeni, A. O., Hymore, F. K., Mudliar, S. N., Deshmukh, S. C., Satpute, D. B., Omoleye, J. A., & 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.078>
- Badshah, M., Lam, D. M., Liu, J., & Mattiasson, B. (2012). Use of an automatic methane potential test system for evaluating the biomethane potential of sugarcane bagasse after different treatments. *Bioresource Technology*, 114, 262-269.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.022>
- Bajpai, P. (2016). Structure of lignocellulosic biomass. In P. Bajpai (Ed.), *Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production* (pp. 7-12). Singapore: Springer Singapore.
- Berlin, A., Balakshin, M., Gilkes, N., Kadla, J., Maximenko, V., Kubo, S., & Saddler, J. (2006). Inhibition of cellulase, xylanase and  $\beta$ -glucosidase activities by softwood lignin preparations. *Journal of Biotechnology*, 125(2), 198-209.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2006.02.021>
- Bhaumik, P., & Dhepe, P. L. (2015). Conversion of biomass into sugars. In *Biomass sugars for non-fuel applications* (pp. 1-53): The Royal Society of Chemistry.
- Blom, A., Peterson, A., Persson, T., Johansson, L.-G., Jarlsvik, T., Jacoby, J., & Kjellvander, H. (2012). *Biogas from lignocellulosic biomass* (Rapport U2012:07). Retrieved from Sweden: <https://docplayer.net/23899419-Biogas-from-lignocellulosic-biomass-issn.html>

- Brownell, H. H., Yu, E. K. C., & Saddler, J. N. (1986). Steam-explosion pretreatment of wood: Effect of chip size, acid, moisture content and pressure drop. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(6), 792-801.  
<https://doi.org/10.1002/bit.260280604>
- Cao, W., Sun, C., Liu, R., Yin, R., & Wu, X. (2012). Comparison of the effects of five pretreatment methods on enhancing the enzymatic digestibility and ethanol production from sweet sorghum bagasse. *Bioresource Technology*, 111, 215-221.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.034>
- Carvalho, K. C. C., Mulinari, D. R., Voorwald, H. J., & Cioffi, M. O. H. (2010). Chemical modification effect on the mechanical properties of HIPS/ Coconut fiber composites. *BioResources*, 5(2), 1143-1155.
- 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, 273-282.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.029>
- Chang, V. S., Burr, B., & Holtzapple, M. T. (1997). Lime pretreatment of switchgrass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 63(1), 3.  
<https://doi.org/10.1007/bf02920408>
- Chang, V. S., Nagwani, M., & Holtzapple, M. T. (1998). Lime pretreatment of crop residues bagasse and wheat straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 74(3), 135-159. <https://doi.org/10.1007/bf02825962>
- Chang, V. S., Nagwani, M., Kim, C.-H., & Holtzapple, M. T. (2001). Oxidative lime pretreatment of high-lignin biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 94(1), 1-28. <https://doi.org/10.1385/abab:94:1:01>
- Chen, H. (2014). *Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Practice*. China: Chemical Industry Press.
- 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, J. J. (2010). Anaerobic digestion for biogas production. In J. J. Cheng (Ed.), *Biomass to Renewable Energy Process* (pp. 151-208). United States of America:

CRC Press.

- Cheng, J. J. (2010). *Biomass to renewable energy process* (J. J. Cheng Ed.). United States of America: CRC Press.
- Chum, H. L., Douglas, L. J., Feinberg, A., & Schroeder, H. A. (1985). *Evaluation of pretreatments of biomass for enzymatic hydrolysis of cellulose* (SERI Report No. SERI/TR-231-2183). Retrieved from Colorado: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/2183.pdf>
- Darwin, Cheng, J. J., Liu, Z., Gontupil, J., & Kwon, O.-S. (2014). Anaerobic co-digestion of rice straw and digested swine manure with different total solid concentration for methane production. *International Journal of Agriculture and Biological Engineering*, 7(6), 79-90. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20140706.00>
- De la Rubia, M. A., Fernández-Cegrí, V., Raposo, F., & Borja, R. (2011). Influence of particle size and chemical composition on the performance and kinetics of anaerobic digestion process of sunflower oil cake in batch mode. *Biochemical Engineering Journal*, 58-59, 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.09.010>
- Delgenés, J. P., Penaud, V., & Moletta, R. (2003). Pretreatments for the enhancement of anaerobic digestion of solid wastes. In J. Mata-Álvarez (Ed.), *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes* (pp. 201-228). United Kingdom: IWA Publishing.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources* (2 ed.). Germany: Weinheim.
- Dioha, I. J., Ikeme, C. H., Nafi'u, T., Soba, N. I., & S., Y. M. B. (2013). Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production. *International Research Journal of Natural Sciences*, 1(3), 1-10.
- Dobermann, A., & Fairhurst, T. H. (2002). Rice straw management. *Better Crops International*, 16, 7-19.
- Donghai, S., Junshe, S., Ping, L., & Yanping, L. (2006). Effects of different pretreatment modes on the enzymatic digestibility of corn leaf and corn stalk. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 14(6), 796-801. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(07\)60014-7](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(07)60014-7)
- 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.
- Duff, S. J. B., & Murray, W. D. (1996). Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: A review. *Bioresource Technology*, *55*, 1-33.  
[https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00122-0](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00122-0)
- Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (2009). *Wood chemistry and biotechnology*. Germany: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- Eskicioglu, C., & Ghorbani, M. (2011). Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode. *Process Biochemistry*, *46*(8), 1682-1687. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.04.013>
- 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>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2012). *Guide to biogas - from production to use*. Germany: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Fagbenro, J. A., & 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 and Plant Analysis*, *30*(17-18), 2345-2362. <http://dx.doi.org/10.1080/00103629909370378>
- Fan, L. T., Lee, Y.-H., & Beardmore, D. H. (1980). Mechanism of the enzymatic hydrolysis of cellulose: Effects of major structural features of cellulose on enzymatic hydrolysis. *Biotechnology and Bioengineering*, *22*(1), 177-199.  
<https://doi.org/10.1002/bit.260220113>
- Fernández-Cegrí, V., Raposo, F., Angeles De la Rubia, M., & Borja, R. (2012). Effects of chemical and thermochemical pretreatments on sunflower oil cake in biochemical methane potential assays. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *88*(5). <https://doi.org/10.1002/jctb.3922>
- Ferreira, L. C., Donoso-Bravo, A., Nilsen, P. J., Fdz-Polanco, F., & Pérez-Elvira, S. I. (2013). Influence of thermal pretreatment on the biochemical methane potential of



- wheat straw. *Bioresource Technology*, 143, 251-257.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.065>
- Ferreira, L. C., Nilsen, P. J., Fdz-Polanco, F., & Pérez-Elvira, S. I. (2014). Biomethane potential of wheat straw: Influence of particle size, water impregnation and thermal hydrolysis. *Chemical Engineering Journal*, 242, 254-259.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.041>
- Fry, S. C. (2001). Plant cell walls. *Encyclopedia of Life Sciences*, 1-11. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/dd4b/e4d23452ef448189ad8f5e99a42a249eaf3d.pdf>
- Garrote, G., Domínguez, H., & Parajó, J. C. (1999). Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(3), 191-202.  
<https://doi.org/10.1007/s001070050039>
- Gerhardt, F. (1929). Effect of acid and alkaline hydrolysis on the estimation of hemicellulose and associated groups in young apple wood. *Plant Physiology*, 4(3), 373-383. <https://doi.org/10.1104/pp.4.3.373>
- Goyal, S., & Sindhu, S. S. (2011). Composting of rice straw using different inocula and analysis of compost quality. *Microbiology Journal*, 1(4), 126-138.  
<https://doi.org/10.3923/mj.2011.126.138>
- Grethlein, H. E. (1985). The effect of pore size distribution on the rate of enzymatic hydrolysis of cellulosic substrates. *Bio/Technology*, 3, 155-160.  
<http://dx.doi.org/10.1038/nbt0285-155>
- Grous, W. R., Converse, A. O., & Grethlein, H. E. (1986). Effect of steam explosion pretreatment on pore size and enzymatic hydrolysis of poplar. *Enzyme and Microbial Technology*, 8(5), 274-280. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(86\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0141-0229(86)90021-9)
- Gu, Y., Chen, X., Liu, Z., Zhou, X., & Zhang, Y. (2014). Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw. *Bioresource Technology*, 158, 149-155.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.011>
- Hansen, T. L., Schmidt, J. E., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J. I. C., Mosbæk, 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>

Harmsen, P. F. H., Huijgen, W., Bermúdez López, L. M., & Bakker, R. R. C. (2010). *Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass* (ECN-E--10-013). Retrieved from <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2010/e10013.pdf>

Hartmann, H., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (2000). Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Science and Technology*, 41(3), 145-153.

He, J. (2014). *Selective cleavage of C-O bonds and hydrodeoxygenation of lignin fragment molecules*. (Doctoral dissertation), Technische Universität München, Germany.

He, Y., Pang, Y., Li, X., Liu, Y., Li, R., & Zheng, M. (2009). Investigation on the changes of main compositions and extractives of rice straw pretreated with sodium hydroxide for biogas production. *Energy & Fuels*, 23(4), 2220-2224. <https://doi.org/10.1021/ef8007486>

He, Y., Pang, Y., Liu, Y., Li, X., & Wang, K. (2008). Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production. *Energy and Fuels*, 22(4), 2775-2781. <https://doi.org/10.1021/ef8000967>

Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>

Holtzapple, M. T., Humphrey, A. E., & Taylor, J. D. (1989). Energy requirements for the size reduction of poplar and aspen wood. *Biotechnology and Bioengineering*, 33(2), 207-210. <https://doi.org/10.1002/bit.260330210>

Hon, D. N.-S., & Shiraishi, N. (2001). *Wood and cellulosic chemistry* (2 ed.). United States of America: Marcel Dekker.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley Eds.). United States of America: Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate change 2014: Synthesis report* (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. Meyer Eds.). Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Isikgor, F. H., & Becer, C. R. (2015). Lignocellulosic biomass: A sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry*, *6*(25), 4497-4559. <https://doi.org/10.1039/C5PY00263J>
- Izumi, K., Okishio, Y.-k., Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., & Toda, T. (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *International Biodeterioration and Biodegradation*, *64*(7), 601-608. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.06.013>
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, *54*(1), 17-46. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3)
- Jensen, P. D., Ge, H., & Batstone, D. J. (2011). Assessing the role of biochemical methane potential tests in determining anaerobic degradability rate and extent. *Water Sci Technol*, *64*(4), 880-886.
- Kaur, K., & Phutela, U. G. (2016). Sodium carbonate pretreatment: an approach towards desilication of paddy straw and enhancement in biogas production. *Paddy and Water Environment*, *14*(1), 113-121. <https://doi.org/10.1007/s10333-015-0483-1>
- Kim, S., & Holtzapple, M. T. (2006). Effect of structural features on enzyme digestibility of corn stover. *Bioresource Technology*, *97*(4), 583-591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.040>
- Kivaisi, A. K., & Eliapenda, S. (1994). Pretreatment of bagasse and coconut fibres for enhanced anaerobic degradation by rumen microorganisms. *Renewable Energy*, *5*(5), 791-795. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90089-2](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90089-2)
- Kratky, L., & Jirout, T. (2011). Biomass size reduction machines for enhancing biogas production. *Chemical Engineering and Technology*, *34*(3), 391-399. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000357>
- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., & Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *48*(8), 3713-3729.

<https://doi.org/10.1021/ie801542g>

Kvillborn, C. (2014). *Enzymatic pretreatment of lignocellulose rich waste for improved biogas production*. (Master's thesis), Linköping University, Sweden. Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:702868/FULLTEXT01.pdf>

Laine, C. (2005). *Structures of hemicelluloses and pectins in wood and pulp*. (Doctoral dissertation), Helsinki University of Technology, Finland.

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.

[https://doi.org/10.2208/jscej.1996.552\\_101](https://doi.org/10.2208/jscej.1996.552_101)

Le Troedec, M., Sedan, D., Peyratout, C., Bonnet, J. P., Smith, A., Guinebretiere, R., . . . Krausz, P. (2008). Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(3), 514-522. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.12.001>

Lee, H. V., Hamid, S. B., & Zain, S. K. (2014). Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose: structure and chemical process. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-20. <https://doi.org/10.1155/2014/631013>

Li, F.-h., Hu, H.-j., Yao, R.-s., Wang, H., & Li, M.-m. (2012). Structure and saccharification of rice straw pretreated with microwave-assisted dilute lye. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(17), 6270-6274.

<https://doi.org/10.1021/ie202547w>

Li, S., Xu, S., Liu, S., Yang, C., & Lu, Q. (2004). Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas. *Fuel Processing Technology*, 85(8-10), 1201-1211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.043>

Liew, L. N., Shi, J., & Li, Y. (2011). Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment. *Bioresource Technology*, 102(19), 8828-8834. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.005>

Limayem, A., & Ricke, S. C. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(4), 449-467.

<https://doi.org/10.1016/j.peccs.2012.03.002>

- Lin, L., Yan, R., Liu, Y., & Jiang, W. (2010). In-depth investigation of enzymatic hydrolysis of biomass wastes based on three major components: Cellulose, hemicellulose and lignin. *Bioresource Technology*, 101(21), 8217-8223.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.084>
- Lin, Y., Wang, D., & Wang, L. (2010). Biological pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge. *Waste Management and Research*, 28(9), 800-810. <https://doi.org/10.1177/0734242X09358734>
- Liu, J., Olsson, G., & Mattiasson, B. (2004). A volumetric meter for monitoring of low gas flow rate from laboratory-scale biogas reactors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 97(2), 369-372. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2003.09.014>
- Mackie, K. L., Brownell, H. H., West, K. L., & Saddler, J. N. (1985). Effect of sulphur dioxide and sulphuric acid on steam explosion of aspenwood. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 5(3), 405-425.  
<https://doi.org/10.1080/02773818508085202>
- Mackulak, T., Prousek, J., Švorc, L., & Drtil, M. (2012). Increase of biogas production from pretreated hay and leaves using wood-rotting fungi. *Chemical Papers*, 66(7), 649-653. <https://doi.org/10.2478/s11696-012-0171-1>
- Mata-Álvarez, J. (2003). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. United Kingdom: IWA Publishing.
- Matthews, R., & Robertson, K. (2005). *Answers to ten frequently asked questions about bioenergy, carbon sinks and their role in global climate change* (2 ed.). Austria: IEA Bioenergy Task 38.
- 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(9), 107-112.
- McMillan, J. D. (1994). Pretreatment of lignocellulosic biomass. In M. E. Himmel, J. O. Baker, & R. P. Overend (Eds.), *Enzymatic conversion of biomass for fuels*

- production* (pp. 292-324). Washington, DC: American Chemical Society.
- Mes-Hartree, M., Dale, B. E., & Craig, W. K. (1988). Comparison of steam and ammonia pretreatment for enzymatic hydrolysis of cellulose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 29(5), 462-468. <https://doi.org/10.1007/BF00269069>
- Michalska, K., Miazek, K., Krzystek, L., & Ledakowicz, S. (2012). Influence of pretreatment with Fenton's reagent on biogas production and methane yield from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 119, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.105>
- Modenbach, A. A., & Nokes, S. E. (2012). The use of high-solids loadings in biomass pretreatment - A review. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(6), 1430-1442. <https://doi.org/10.1002/bit.24464>
- Mohamad Remli, N. A., Kalsom Md Shah, U., Mohamad, R., & Abd-Aziz, S. (2014). Effects of chemical and thermal pretreatments on the enzymatic saccharification of rice straw for sugars production. 9, 510-522. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.510-522>
- Mohanty, M. (2015). *Simulation of nitrogen release from organic materials in the soybean/wheat cropping systems on Vertisols in central India*. (Doctoral dissertation), The University of Queensland, Australia.
- Montgomery, H., Dymock, J. F., & Thom, N. (1962). The rapid colorimetric determination of organic acids and their salts in sewage-sludge liquor. *Analyst*, 87, 949-955. <https://doi.org/10.1039/AN9628700949>
- Montgomery, L. F. R., & Bochmann, G. (2014). *Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production*. United Kingdom: IEA Bioenergy.
- Mooney, C. A., Mansfield, S. D., Touhy, M. G., & Saddler, J. N. (1998). The effect of initial pore volume and lignin content on the enzymatic hydrolysis of softwoods. *Bioresource Technology*, 64(2), 113-119. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00181-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00181-8)
- Morjanoff, P. J., & Gray, P. P. (1987). Optimization of steam explosion as a method for increasing susceptibility of sugarcane bagasse to enzymatic saccharification. *Biotechnology and Bioengineering*, 29(6), 733-741. <https://doi.org/10.1002/bit.260290610>

- Moset, V., Al-zohairi, N., & Møller, H. B. (2015). The impact of inoculum source, inoculum to substrate ratio and sample preservation on methane potential from different substrates. *Biomass and Bioenergy*, *83*, 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.018>
- Mousavi, S.-F., Moazzeni, M., Mostafazadeh-Fard, B., & Yazdani, M. (2012). Effects of rice straw incorporation on some physical characteristics of paddy soils. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *14*(5), 1173-1183.
- Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, A. K., Rubindamayugi, M. S. T., & Mattiasson, B. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. *Renewable Energy*, *31*(14), 2385-2392. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.10.015>
- Murphy, J. D., & Power, N. M. (2009). An argument for using biomethane generated from grass as a biofuel in Ireland. *Biomass and Bioenergy*, *33*(3), 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.018>
- 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.
- Mussoline, W., Esposito, G., Giordano, A., & Lens, P. (2013). The anaerobic digestion of rice straw: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *43*(9), 895-915. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.627018>
- Muthangya, M., Mshandete, A. M., & Kivaisi, A. K. (2009). Two-stage fungal pre-treatment for improved biogas production from sisal leaf decortication residues. *International Journal of Molecular Sciences*, *10*(11), 4805-4815. <https://doi.org/10.3390/ijms10114805>
- Nathalie, D., François, G., & Bernard, K. (2003). The unmasking of lignin structures in wheat straw by alkali. *Phytochemistry*, *63*(5), 617-623. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9422\(03\)00187-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9422(03)00187-0)
- Nieves, D. C., Karimi, K., & Horváth, I. S. (2011). Improvement of biogas production from oil palm empty fruit bunches (OPEFB). *Industrial Crops and Products*, *34*, 1097-1101. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.022>
- Paepatung, N., Nopharatana, A., & Songkasiri, W. (2009). Bio-methane potential of

- biological solid materials and agricultural wastes. *Asian Journal on Energy and Environment*, 10(1), 19-27.
- Panagiotou, G., & Olsson, L. (2007). Effect of compounds released during pretreatment of wheat straw on microbial growth and enzymatic hydrolysis rates. *Biotechnology and Bioengineering*, 96(2), 250-258.  
<https://doi.org/10.1002/bit.21100>
- Rafique, R., Poulsen, T. G., Nizami, A.-S., Asam, Z.-u.-Z., Murphy, J. D., & Kiely, G. (2010). Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. *Energy*, 35(12), 4556-4561.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.011>
- Ramos, L. P. (2003). The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials citation. *Química Nova*, 26(6), 863-871. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000600015>
- Ramos, L. P., Breuil, C., & Saddler, J. N. (1992). Comparison of steam pretreatment of eucalyptus, aspen, and spruce wood chips and their enzymatic hydrolysis. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 34(35), 37-48.  
<https://doi.org/10.1007/BF02920532>
- 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.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2008.03.030>
- Raud, M., Tutt, M., Olt, J., & Kikas, T. (2015). Effect of lignin content of lignocellulosic material on hydrolysis efficiency. *Agronomy Research*, 13(2), 405-412.
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association.
- Richard, T. (1996). Estimating Carbon Content. Retrieved from  
<http://compost.css.cornell.edu/calc/carbon.html>
- Romano, R. T., Zhang, R., Teter, S., & McGarvey, J. A. (2009). The effect of enzyme addition on anaerobic digestion of JoseTall Wheat Grass. *Bioresource Technology*, 100(20), 4564-4571. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.065>



- Rout, J., Misra, M., Tripathy, S. S., Nayak, S. K., & Mohanty, A. K. (2001). The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites. *Composites Science and Technology*, *61*(9), 1303-1310. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00021-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00021-5)
- Rozzi, A., & Remigi, E. (2004). Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: a literature review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *3*(2), 93-115. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-5762-z>
- Saha, B. C., Iten, L. B., Cotta, M. A., & Wu, Y. V. (2005). Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification, and fermentation of rice hulls to ethanol. *Biotechnology Progress*, *21*(3), 816-822. <https://doi.org/10.1021/bp049564n>
- 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), 554-556. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000341>
- Sapci, Z. (2013). The effect of microwave pretreatment on biogas production from agricultural straws. *Bioresource Technology*, *128*, 487-494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.094>
- Schell, D. J., & Harwood, C. (1994). Milling of lignocellulosic biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *45*, 159-168. <https://doi.org/10.1007/BF02941795>
- Sharma, A., Sharma, R., Arora, A., Shah, R., Singh, A., Pranaw, K., & Nain, L. (2014). Insights into rapid composting of paddy straw augmented with efficient microorganism consortium. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, *3*(2), 54. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0054-2>
- Sharma, S. K., Mishra, I. M., Sharma, M. P., & Saini, J. S. (1988). Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. *Biomass*, *17*(4), 251-263. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(88\)90107-2](https://doi.org/10.1016/0144-4565(88)90107-2)
- 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)*. Golden, Colorado: National Renewable

Energy Laboratory.

- Søndergaard, M. M., Fotidis, I. A., Kovalovszki, A., & Angelidaki, I. (2015). Anaerobic co-digestion of agricultural byproducts with manure for enhanced biogas production. *Energy and Fuels*, *29*(12), 8088-8094.  
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02373>
- Song, Z., Gaihe, Y., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y., & Liao, Y. (2014). Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. *PLoS one*, *9*(4), e93801-e93801.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093801>
- Song, Z., Yang, G., Guo, Y., & Zhang, T. (2012). Comparison of two chemical pretreatments of rice straw for biogas production by anaerobic digestion. *Bioresource*, *7*(3), 3223-3236. <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.3223-3236>
- Song, Z., Yang, G., Han, X., Feng, Y., & Ren, G. (2013). Optimization of the alkaline pretreatment of rice straw for enhanced methane yield. *BioMed Research International*, *2013*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2013/968692>
- Song, Z., Yang, G., Zhang, T., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Effect of Ca(OH)<sub>2</sub> pretreatment on biogas production of rice straw fermentation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *28*(19), 207-213.
- Sparks, D. L. (1996). *Methods of soil analysis part 3 - Chemical methods*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
- Stone, J. E., Scallan, A. M., Donefer, E., & Ahlgren, E. (1969). Digestibility as a simple function of a molecule of similar size to a cellulase enzyme. In *Cellulases and Their Applications* (Vol. 95, pp. 219-241). Washington, DC: American Chemical Society.
- Sträuber, H., Bühligen, F., Kleinsteuber, S., Nikolausz, M., & Porsch, K. (2015). Improved anaerobic fermentation of wheat straw by alkaline pre-treatment and addition of alkali-tolerant microorganisms. *Bioengineering*, *2*(2), 66-93.  
<https://doi.org/10.3390/bioengineering2020066>
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technology*, *83*, 1-11.  
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7)

- Tabatabaei, M., & Ghanavati, H. (2018). *Biogas - fundamentals, process, and operation* (Vol. 6). Switzerland: Springer International Publishing AG.
- Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9), 1621-1651. <https://doi.org/10.3390/ijms9091621>
- Take, H., Andou, Y., Nakamura, Y., Kobayashi, F., Kurimoto, Y., & Kuwahara, M. (2006). Production of methane gas from Japanese cedar chips pretreated by various delignification methods. *Biochemical Engineering Journal*, 28, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.08.036>
- Teghammar, A. (2013). *Biogas production from lignocelluloses: Pretreatment, substrate characterization, co-digestion, and economic evaluation*. (Doctoral dissertation), University of Borås, Sweden.
- Teghammar, A., Yngvesson, J., Lundin, M., Taherzadeh, M. J., & Horváth, I. S. (2010). Pretreatment of paper tube residuals for improved biogas production. *Bioresource Technology*, 101(4), 1206-1212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.029>
- Teixeira, L. C., Linden, J. C., & Schroeder, H. A. (1999). Alkaline and peracetic acid pretreatments of biomass for ethanol production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 77, 19-34. <https://doi.org/10.1385/ABAB:77:1-3:19>
- Torget, R., Himmel, M. E., & Grohmann, K. (1991). Dilute sulfuric acid pretreatment of hardwood bark. *Bioresource Technology*, 35(3), 239-246. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90120-9](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90120-9)
- Twyman, R. M. (2005). Sample Dissolution for Elemental Analysis/ Wet Digestion. In P. Worsfold, A. Townshend, & C. Poole (Eds.), *Encyclopedia of Analytical Science* (Vol. 2, pp. 146-152). London: Elsevier Academic Press.
- United States Environment Protection Agency. (2001). Method 1684 total, fixed, and volatile solids in water, solids, and biosolids. Retrieved from <http://www.caslab.com/EPA-Methods/PDF/EPA-Method-1684.pdf>
- Vilay, V., Mariatti, M., Mat Taib, R., & Todo, M. (2008). Effect of fiber surface treatment and fiber loading on the properties of bagasse fiber-reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 68(3), 631-638.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.005>

- Visakh, P. M., & Thomas, S. (2010). Preparation of bionanomaterials and their polymer nanocomposites from waste and biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 1, 121-134. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9009-7>
- 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*. (Doctoral dissertation), Lund University, Sweden.
- Wang, B., Nges, I. A., Nistor, M., & Liu, J. (2014). Determination of methane yield of cellulose using different experimental setups. *Water Sci Technol*, 70(4), 599-604. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.275>
- Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D. (2013). *The biogas handbook: science, production and applications*. United States of America: Woodhead.
- Wilkie, A. C. (2005). *Anaerobic digestion of dairy manure: Design and process considerations*. Paper presented at the Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, New York.
- Wright, J. D. (1988). Ethanol from biomass by enzymatic hydrolysis. *Chemical Engineering Progress*, 84(8), 62-74.
- Wyman, C. E. (1996). *Handbook on bioethanol : production and utilization*. Washington, DC: Taylor & Francis.
- Xu, Z., Wang, Q., Jiang, Z., Yang, X.-x., & Ji, Y. (2007). Enzymatic hydrolysis of pretreated soybean straw. *Biomass and Bioenergy*, 31(2), 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.015>
- Zhang, Q., Tang, L., Zhang, J., Mao, Z., & Jiang, L. (2011). Optimization of thermal-dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues. *Bioresource Technology*, 102(4), 3958-3965. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.031>
- Zhang, Y., Chen, X., Gu, Y., & Zhou, X. (2015). A physicochemical method for increasing methane production from rice straw: Extrusion combined with alkali

- pretreatment. *Applied Energy*, 160, 39-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.011>
- Zhao, J. (2013). *Enhancement of methane production from solid-state anaerobic digestion of yard trimmings by biological pretreatment*. (Master's thesis), Ohio State University, United States of America.
- Zheng, M., Li, X., Li, L., Yang, X., & He, Y. (2009). Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment. *Bioresource Technology*, 100(21), 5140-5145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.045>
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35-53. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>
- Zhong, W., Zhang, Z., Luo, Y., Sun, S., Qiao, W., & Xiao, M. (2011). Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresource Technology*, 102(24), 11177-11182. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.077>
- Zhu, J., Wan, C., & Li, Y. (2010). Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. *Bioresource Technology*, 101(19), 7523-7528.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.060>
- Zou, S., Wang, H., Wang, X., Zhou, S., Li, X., & Feng, Y. (2016). Application of experimental design techniques in the optimization of the ultrasonic pretreatment time and enhancement of methane production in anaerobic co-digestion. *Applied Energy*, 179, 191-202.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.120>



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาคผนวก ก

รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างฟางข้าวและการปรับสภาพฟางข้าว

## การเตรียมตัวอย่างฟางข้าวและการปรับสภาพฟางข้าว

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องบด (Cutting mill) ของ Retsch รุ่น SM 2000
2. ตะแกรงร่อนตัวอย่าง (Sieve) ของ ELE international ขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร
3. เครื่องชั่ง (Analytical balance)
  - ความละเอียด 10 กรัม ของ OHAUS รุ่น Defender 3000
  - ความละเอียด 5 กรัม ของ Mettler – Toledo รุ่น BBA211-5BA30
  - ความละเอียด 0.01 กรัม ของ Mettler – Toledo รุ่น PB3002
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของ Schott รุ่น Lab 850
5. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ที่ระดับอุณหภูมิ 60 ± 2 70 ± 2 80 ± 2 และ 90 ± 2 องศาเซลเซียส
6. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ของ Thermolyne hot plate รุ่น 2200
7. เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น บีกเกอร์ (Beaker) ขวดแก้วเก็บสารละลาย (Laboratory bottle) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) กระจกฉีดยา (Wash bottle) ถังพลาสติกพร้อมฝาปิด ขนาด 60 ลิตร ถังกรองขนาดรูพรุน 80 ไมครอน เป็นต้น

### สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก)  
ละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 97 จำนวน 51.55 กรัม ในน้ำประปา และเติมน้ำประปาให้มีน้ำหนักสารละลายรวม 1 กิโลกรัม
2. สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก)  
ละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 97 จำนวน 103.09 กรัม ในน้ำประปา และเติมน้ำประปาให้มีน้ำหนักสารละลายรวม 1 กิโลกรัม
3. สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก)  
ละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 97 จำนวน 154.64 กรัม ในน้ำประปา และเติมน้ำประปาให้มีน้ำหนักสารละลายรวม 1 กิโลกรัม



### วิธีการเตรียมตัวอย่างฟางข้าว

1. อบฟางข้าวให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่ระดับอุณหภูมิ  $60 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่หลงเหลืออยู่
2. ตัดสับฟางข้าวด้วยเครื่องบด
3. ร่อนฟางข้าวผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่อง 2.0 และขนาด 0.5 มิลลิเมตร เพื่อคัดขนาดฟางข้าวให้มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 – 2 มิลลิเมตร
4. ผสมคลุกเคล้าตัวอย่างฟางข้าวให้เข้ากันดี และเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อรอการวิเคราะห์ โดยตัวอย่างฟางข้าวที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมฟางข้าวนี้ เรียกว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated rice straw, Untreated)

### วิธีการปรับสภาพฟางข้าว

1. การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง
 

การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) และแต่ละความเข้มข้นใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพแตกต่างกัน 3 ช่วงระยะเวลา ได้แก่ 3 6 และ 12 วัน โดยสภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้องสามารถสรุปได้ดังตารางที่ ก.1 และมีวิธีการปรับสภาพดังนี้

  - 1.1 เติมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นดังที่ระบุในตารางที่ ก.1 จำนวน 20 กิโลกรัม ลงในถังพลาสติก ขนาด 60 ลิตร หลังจากนั้นเติมฟางข้าวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างจำนวน 1 กิโลกรัม (อัตราส่วน ฟางข้าว : สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 : 20 (โดยน้ำหนัก))
  - 1.2 กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปิดฝาถังและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องตามระยะเวลาที่กำหนด
  - 1.3 หลังจากครบระยะเวลาการปรับสภาพ แยกส่วนของฟางข้าวและสารละลายโดยกรองผ่านถุงกรองขนาดรูพรุน 80 ไมครอน
  - 1.4 ล้างตัวอย่างฟางข้าวด้วยน้ำประปา จนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างฟางข้าวอยู่ในระดับเป็นกลาง (ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7 – 8)
  - 1.5 ผึ่งตัวอย่างฟางข้าวบนผ้าขาวบาง แล้วอบให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่ระดับอุณหภูมิ  $60 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
  - 1.6 ผสมคลุกเคล้าตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพแต่ละสภาวะให้เข้ากันดี
  - 1.7 เก็บในถุงพลาสติก เพื่อรอการวิเคราะห์

ตารางที่ ก.1

สภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้นของสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ)	ระยะเวลาการปรับสภาพ (วัน)	สภาวะการปรับสภาพ
5	3	5%-3d
	6	5%-6d
	12	5%-12d
10	3	10%-3d
	6	10%-6d
	12	10%-12d
15	3	15%-3d
	6	15%-6d
	12	15%-12d

## 2. การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เป็นการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) และแต่ละความเข้มข้นปรับสภาพด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่  $70 \pm 2$   $80 \pm 2$  และ  $90 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง เนื่องจาก Kumar and Sani (2018) กล่าวว่า การปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำตาลสูง โดยใช้ระยะเวลาการปรับสภาพเพียง 1 – 3 ชั่วโมง จำเป็นต้องทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูง (85 – 135 องศาเซลเซียส) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดระยะเวลาการปรับสภาพฟางข้าวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ดังกล่าว สำหรับสภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องสามารถสรุปได้ดังตารางที่ ก.2 และมีวิธีการปรับสภาพดังนี้

2.1 ชั่งตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างใส่ลงในขวดแก้วเก็บสารละลายขนาด 1 ลิตร จำนวน 50 กรัม

2.2 เติมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ระดับความเข้มข้นดังที่ระบุในตารางที่ ก.2 จำนวน 1 กิโลกรัม (อัตราส่วน ฟางข้าว : สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 : 20 (โดยน้ำหนัก))

2.3 แก้วของผสมในขวดแก้วให้เข้ากันดี

2.4 ตั้งขวดแก้วที่บรรจุของผสมบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) จนกระทั่งของผสมภายในขวดมีอุณหภูมิที่ตั้งระบุในตารางที่ ก.2

2.5 นำเข้าตู้อบลมร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนดเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

2.6 นำออกจากตู้อบลมร้อนและล้างตัวอย่างฟางข้าวด้วยน้ำประปาผ่านถุงกรองขนาดรูพรุน 80 ไมครอน จนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างฟางข้าวอยู่ในระดับเป็นกลาง (พีเอชระหว่าง 7 – 8)

2.7 ผึ่งตัวอย่างฟางข้าวบนผ้าขาวบาง แล้วอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ  $60 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

2.8 ผสมคลุกเคล้าตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพแต่ละสภาวะให้เข้ากันดีก่อนเก็บในถุงพลาสติก เพื่อรอการวิเคราะห์

ตารางที่ ก.2

สภาวะการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

ระดับความเข้มข้นของสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ)	อุณหภูมิการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	สภาวะการปรับสภาพ
5	$70 \pm 2$	5%-70C
	$80 \pm 2$	5%-80C
	$90 \pm 2$	5%-90C
10	$70 \pm 2$	10%-70C
	$80 \pm 2$	10%-80C
	$90 \pm 2$	10%-90C
15	$70 \pm 2$	15%-70C
	$80 \pm 2$	15%-80C
	$90 \pm 2$	15%-90C



## 1. ของแข็งรวม (Total solids)

### ของแข็งระเหย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งรวมทำโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยและของแข็งคงตัวทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตามวิธีที่ระบุใน Rice, Baird, Eaton, and Clesceri (2012) Part 2540 G และ United States Environment Protection Agency (2001) Method 1684

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส
3. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส
4. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
5. โถดูดความชื้น (Desiccator)

#### วิธีวิเคราะห์

##### ก. ของแข็งรวม (Total solids)

1. เมาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเตาเผา
2. ปลอ่ยถ้วยกระเบื้องให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_{dish}$
3. ใส่ตัวอย่างฟางข้าวขนาด 0.5 – 2 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 1.0 กรัม ลงในถ้วยกระเบื้องที่ผ่านการเผาแล้ว จากนั้นชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างฟางข้าวและถ้วยกระเบื้อง บันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_{sample}$  (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10)
4. นำถ้วยกระเบื้องที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วปลอ่ยให้เย็นในโถดูดความชื้น
5. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ บันทึกน้ำหนัก
6. นำถ้วยกระเบื้องที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่มาอบต่อ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปลอ่ยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

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

#### ข. ของแข็งระเหย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

1. นำถ้วยกระเบื้องที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ (ก.6) เข้าเตาเผาขณะอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นอุณหภูมิห้อง แล้วตั้งอุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเป็น  $550 \pm 25$  องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 1 ชั่วโมง

2. ปล่อยให้ถ้วยกระเบื้องที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่มาเผาอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ  $550 \pm 25$  องศาเซลเซียส โดยนำเข้าเตาเผาขณะอุณหภูมิภายในเตาเผาเป็นอุณหภูมิห้อง แล้วตั้งอุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเป็น  $550 \pm 25$  องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 30 นาที ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

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

#### การคำนวณ

1. ของแข็งรวม (Total solids)

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

โดยที่

$W_{dish}$  = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

$W_{sample}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องก่อนอบ (มิลลิกรัม)

$W_{total}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

## 2. ของแข็งระเหย (Volatile solids)

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

โดยที่

$W_{\text{dish}}$  = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

$W_{\text{total}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

$W_{\text{volatile}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

## 3. ของแข็งคงตัว (Fixed solids)

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

โดยที่

$W_{\text{dish}}$  = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

$W_{\text{total}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

$W_{\text{volatile}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)



## 2. อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

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

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม
3. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
4. บิวเรตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto burette)
5. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
6. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
7. ขวดخمพู่ (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,  $(NH_4)_2Fe(SO_4) \cdot 6H_2O$ ) จำนวน 196 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรด



ซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป จำนวน 20 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตนี้ต้องการเทียบมาตรฐาน (Standardize) กับ สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้ง ก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์มัล จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในขวด ชมพู่ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 40 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์มัล
- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จาก สูตร

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

โดยที่

$N_{FAS}$  = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) (นอร์มัล)

$V_{FAS}$  = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวขนาด 0.5 – 2 มิลลิเมตร จำนวน 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1.0 นอร์มัล ลงในขวดชมพู่ จำนวน 20 มิลลิลิตร แก้วขวดชมพู่เบา ๆ ให้ฟางข้าวผสมกับสารละลาย
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 40 มิลลิลิตร โดยเร็ว ให้กรดผสมกับ สารละลายตัวอย่างโดยตรง แก้วขวดชมพู่เบา ๆ ให้สารละลายตัวอย่างผสมเข้ากันดี เป็นเวลา 1 นาที
4. ตั้งขวดชมพู่ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อให้ทำปฏิกิริยา
5. เติมน้ำกลั่น จำนวน 100 มิลลิลิตร
6. หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด

7. ไทเทรตสารละลายในขวดชมพู ด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล เมื่อสารละลายใกล้ถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเข้ม ที่จุดนี้ค่อย ๆ เติม สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปช้า ๆ (ทีละหยด) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียว อมน้ำเงินเป็นสีน้ำตาลแกมแดง

8. เมื่อพบว่าปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตอยู่ ระหว่าง 0 – 8 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่ โดยลดน้ำหนักตัวอย่างฟางข้าวลง หรือพบว่าปริมาตรของ สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตเท่ากับหรือมากกว่า 34 มิลลิลิตร ให้ทำใหม่ เช่นกัน โดยเพิ่มน้ำหนักตัวอย่างฟางข้าวให้มากขึ้น

9. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างฟางข้าว และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการ วิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ 2. – 8.)

#### การคำนวณ

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

โดยที่

$T_1$  = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับชุด ควบคุม (มิลลิลิตร)

$T_2$  = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับ ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

$N_{\text{FAS}}$  = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (นอร์แมล)

0.003 = น้ำหนักสมมูลของคาร์บอน (กรัม)

$O_f$  = Oxidation factor (เท่ากับ 1.4550)

$W_{\text{solid sample}}$  = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

mf = Moisture correction factor (ข้อมูลผลการวิเคราะห์ตั้งภาคผนวก ข)

### 3. ไนโตรเจนรวม (Total nitrogen)

การหาปริมาณไนโตรเจนรวมมีขั้นตอนการวิเคราะห์ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การย่อย (Digestion) การกลั่น (Distillation) และการไทเทรต (Titration) มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังระบุใน ASTM International (2006) Designation E 778 – 87

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม
3. ขวดเจตาห์ลสำหรับย่อยตัวอย่าง (Kjeldahl digestion flask) ขนาด 800 มิลลิลิตร
4. เตาทลุ้มให้ความร้อน (Multi-heating mantles)
5. ชุดกลั่นไนโตรเจน (Macro-kjeldahl distillation unit)
6. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
7. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
8. บิวเรตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto burette)
9. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กแบบให้ความร้อน (Hot plate stirrer)
10. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
11. ขวดชมพู (Erlenmeyer flask)
12. ปีกเกอร์ (Beaker)
13. กระบอกตวง (Cylinder)
14. กระบอกฉีดยาน้ำกลั่น (Wash bottle)
15. เม็ดแก้ว (Glass beads)

#### 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. สารละลายด่าง (Alkali solution) 12.5 นอร์แมล

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 500 กรัม ในน้ำกลั่น ประมาณ 800 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในปีกเกอร์ (ควรเตรียมในตู้

ดูดควัน และวางบีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้จะร้อนมาก) เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกที่มีฝาเกลียว

4. สารละลายกรดบอริก (Boric acid)

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

5. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator)

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 ลงในเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ในขวดปรับปริมาตร

7. สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล

ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 2.7 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ต้องการความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

- 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 หยดเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ จำนวน 6 หยด
- นำไปไทเทรตกับสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดง
- นำขวดชมพู่ไปต้มให้สารละลายเดือดเป็นเวลา 2 นาที สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง
- ใช้น้ำหล่อเย็นด้านนอกของขวดชมพู่ จนสารละลายมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
- ไทเทรตต่อกับสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล จนได้สารละลายสีแดง
- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกจากสูตรต่อไปนี้ โดยใช้น้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) ของโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 53.0 กรัม โซเดียมคาร์บอเนตต่ออิกิววาเลนต์ ( $53 \text{ g } Na_2CO_3/\text{eq}$ )

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

โดยที่

$N_{\text{Sulfuric acid}}$  = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริก (นอร์แมล)

A = น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต (กรัม)

B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

### วิธีวิเคราะห์

#### ก. การเตรียมเครื่องมือ

1. ปิดเตาสารละลายกรดบอริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. หยดสารละลายอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 6 หยด จากนั้นนำไปวางตรงตำแหน่งที่รองรับก๊าซแอมโมเนียจากการกลั่น โดยให้ปลายของเครื่องควบแน่นจุ่มอยู่ที่สารละลาย
3. เติมน้ำกลั่น จำนวน 300 มิลลิลิตร ลงขวดเจตาห์ล
4. ใส่เม็ดแก้ว จำนวน 5 เม็ด
5. เติมสารละลายต่าง จำนวน 25 มิลลิลิตร โดยเอียงขวดเจตาห์ลและค่อย ๆ เติมสารละลายต่างให้ไหลลงตามคอขวดเพื่อให้เกิดชั้นของต่างที่กั้นขวด
6. ต่อกววดเจตาห์ลเข้ากับชุดกลั่นทันที และค่อย ๆ แกว่งสารละลายในขวดเจตาห์ลให้ผสมกันดี จากนั้นวางขวดเจตาห์ลลงบนเตาหลุมให้ความร้อน
7. เปิดเตาให้ความร้อน โดยควบคุมให้มีอัตราการกลั่นสูงสุดประมาณ 350 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กลั่นล้างเครื่องมือจนกระทั่งสิ่งที่กลั่นได้ (Distillate) แสดงให้เห็นว่าไม่มีแอมโมเนียหรือมีน้อยมาก

#### ข. การย่อย

1. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวขนาด 0.5 – 2 มิลลิเมตร ประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในขวดเจตาห์ลสำหรับย่อยตัวอย่าง
2. ใส่สารผสมเร่งปฏิกิริยา (Kjelblet) จำนวน 1 เม็ด (น้ำหนักเม็ดละประมาณ 3.5 กรัม)
3. ใส่เม็ดแก้ว จำนวน 5 เม็ด
4. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 30 มิลลิลิตร ในตู้ดูดควัน โดยค่อย ๆ เติมกรดให้ไหลลงตามคอขวดเจตาห์ล และแกว่งขวดเจตาห์ลเบา ๆ ให้ตัวอย่างฟางข้าวผสมกับกรด
5. ตั้งขวดเจตาห์ลบนเตาหลุมให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 380 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใสมีสีเขียวยอมฟ้า ในระหว่างการย่อยควรแกว่งขวดเจตาห์ลเป็นระยะ ๆ

6. ปล่อยตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
7. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 300 มิลลิลิตร แกว่งให้สารละลายผสมกันดี
8. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างฟางข้าว และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ข้อ ข.2. - ข.7.)

### ค. การกลั่น

1. จัดเตรียมชุดกลั่นให้พร้อมใช้งาน และเปิดน้ำเย็นผ่านเข้าเครื่องควบแน่น (Condenser)
2. ปิเปตสารละลายกรดบอริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. หยดสารละลายอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 6 หยด จากนั้นนำไปวางตรงตำแหน่งที่รองรับก๊าซแอมโมเนียจากการกลั่น โดยให้ปลายของเครื่องควบแน่นจุ่มอยู่ที่สารละลาย
4. นำขวดเจตาห์ลจากขั้นตอนการย่อย (ข.7.) มาเติมสารละลายต่าง จำนวน 100 มิลลิลิตร โดยเอียงขวดเจตาห์ลและค่อย ๆ เติมสารละลายต่างให้ไหลลงตามคอขวดเพื่อให้เกิดชั้นของต่างที่กันขวด
5. ต่อขวดเจตาห์ลเข้ากับชุดกลั่นทันที และค่อย ๆ แกว่งสารละลายในขวดเจตาห์ลให้ผสมกันดี จากนั้นวางขวดเจตาห์ลลงบนเตาหลุมให้ความร้อน
6. เปิดเตาให้ความร้อน โดยควบคุมให้อัตราการกลั่นสูงสุดประมาณ 350 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จนสามารถเก็บส่วนที่กลั่นได้ (Distillate) มีปริมาตรประมาณ 100 – 150 มิลลิลิตร ตั้งปลายของเครื่องควบแน่นให้พ้นผิวสารละลาย ทำการกลั่นต่ออีกประมาณ 2 นาที เพื่อทำความสะอาดเครื่องควบแน่น และฉีดล้างปลายเครื่องควบแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดชมพู
7. นำสารละลายที่กลั่นได้ ไปทำการไทเทรตในขั้นตอนต่อไป
8. กลั่นชุดควบคุม (Blank) และนำไปไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่าง

### ง. การไทเทรต

ไทเทรตสารละลายในขวดชมพูที่กลั่นได้จากขั้นตอนการกลั่น ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล เมื่อถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีม่วงอ่อน (Pale lavender)

### การคำนวณ

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

โดยที่

- A = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)  
B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม (มิลลิลิตร)  
N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (นอร์มัล)  
C = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัมของแข็งรวม)



#### 4. ฟอสฟอรัสรวม (Total phosphorus)

การหาปริมาณฟอสฟอรัสรวมประกอบด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดผสมระหว่าง  $\text{HNO}_3$  :  $\text{H}_2\text{SO}_4$  :  $\text{HClO}_4$  อัตราส่วน 3 : 1 : 1 ตามที่ระบุใน Twyman (2005) และการทำให้เกิดสีเพื่อหาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธีวานาโดมอลิบโดฟอสฟอริกแอซิด (Vanadomolybdophosphoric acid method) ตามที่ระบุใน Sparks (1996)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม
3. ขวดเจดดาห์สำหรับย่อยตัวอย่าง (Kjeldahl digestion flask) ขนาด 800 มิลลิลิตร
4. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
5. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
6. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
7. เตากลุมให้ความร้อน (Multi heating mantles)
8. ชุดกรองบูชเนอร์ (Buchner filtration apparatus)
9. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
10. กระบอกตวง (Cylinder)
11. ขวดخمพู่ (Erlenmeyer flask)
12. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
13. กระบอกฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)
14. เม็ดแก้ว (Glass beads)

##### สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. กรดไนตริกเข้มข้น (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) ร้อยละ 65
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ร้อยละ 98
3. กรดเพอร์คลอริกเข้มข้น (Perchloric acid,  $\text{HClO}_4$ ) ร้อยละ 70 – 72
4. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (สารละลาย A)

ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดตเตตระไฮเดรต (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. สารละลายแอมโมเนียมวานาเตต (สารละลาย B)

ละลายแอมโมเนียมวานาเตต (Ammonium vanadate,  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) 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

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,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 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 2 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 ชั่งตัวอย่างฟางข้าวขนาด 0.5 – 2 มิลลิเมตร จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดเจตาห์ล

1.2 ใส่เม็ดแก้ว จำนวน 5 เม็ด

1.3 เติมกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 จำนวน 15 มิลลิลิตร โดยให้กรดไนตริกเข้มข้นค่อย ๆ ไหลลงตามคอขวดและชะล้างตัวอย่างฟางข้าวที่ติดอยู่บริเวณคอขวดให้ไหลลงไปในขวดเจตาห์ล

1.4 ต้มย่อยตัวอย่างบนเตาหลุมให้ความร้อน โดยใช้ความร้อนต่ำ ซึ่งขณะต้มย่อยตัวอย่างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น จะสังเกตเห็นควันสีเหลืองส้มเกิดขึ้นค่อนข้างหนาแน่นในช่วงแรก ต้มต่อไปจนควันสีเหลืองจางลง และปริมาตรสารละลายตัวอย่างลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.5 หยุดการต้มย่อย ปล่อยให้ตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

1.6 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 5 มิลลิลิตร และเติมกรดเพอร์คลอริกเข้มข้นร้อยละ 70 – 72 จำนวน 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ

1.7 แก้วขวดเจตาห์ลเบา ๆ ให้สารละลายผสมเข้ากันดี

1.8 ต้มย่อยต่อโดยใช้ความร้อนที่สูงขึ้น ในช่วงแรกของการต้มย่อยในขั้นตอนนี้ จะสังเกตเห็นควันสีเหลืองส้ม ต่อมาควันจะมีลักษณะเป็นสีขาว ต้มย่อยต่อจนได้สารละลายใสและมีปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

1.9 หยุดการต้มย่อย ปล่อยให้ตัวอย่างให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

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

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

## 2. การทำให้เกิดสีและการวัดค่าการดูดกลืนแสง

2.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 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

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

โดยที่

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



## 5. ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในที่นี้เป็น การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของแข็ง (Solid substrate) โดยใช้วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux method) ตามที่ระบุใน Raposo, de la Rubia, Borja, and Alaiz (2008)

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม
3. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
4. บิวเรตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto burette)
5. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
6. เตาทลุ้มให้ความร้อน (Multi heating mantles)
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,  $Ag_2SO_4$ ) จำนวน 10 กรัม ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 1000 มิลลิลิตร

4. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate solution) 1.0 นอร์แมล  
 ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate,  $K_2Cr_2O_7$ ) เกรดสารมาตรฐาน  
 ปฐมภูมิ (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 (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

6. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล  
 ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate  
 hexahydrate,  $(NH_4)_2Fe(SO_4) \cdot 6H_2O$ ) จำนวน 196.11 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติม  
 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ลงไป จำนวน 40 มิลลิลิตร ปล่อยให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1  
 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตนี้ต้องทำการเทียบมาตรฐาน (Standardize) กับ  
 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้ง ก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้

- ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์แมล จำนวน 10 มิลลิลิตร เติมน้ำ  
 กลั่นลงไป 60 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 30 มิลลิลิตร  
 ปล่อยให้เย็น หยดสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ จำนวน 8 หยด ไทเทรตกับ  
 สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 นอร์แมล
- คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จาก  
 สูตร

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

โดยที่

$N_{FAS}$  = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์สแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS)  
(นอร์แมล)

$V_{FAS}$  = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์สแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต  
(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. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวขนาด 0.5 – 2 มิลลิเมตร จำนวน 0.1 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างแต่ละซ้ำไม่ควรต่างกันเกินร้อยละ 10) ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้วลงไป 4 – 5 เม็ด
2. ปิบน้ำกลั่น จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม
3. ปิเบตสารละลายสำหรับการย่อยสลาย จำนวน 20 มิลลิลิตร และค่อย ๆ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก จำนวน 30 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ แกว่งขวดก้นกลมให้สารละลายผสมกันดี
4. ต่อขวดก้นกลมเข้ากับชุดกลั่นแบบไหลกลับ และวางขวดก้นกลมบนเตาให้ความร้อน พร้อมเปิดน้ำเข้าชุดกลั่นแบบไหลกลับ
5. ปิดปลายด้านบนของเครื่องควบแน่น (Condenser) ด้วยปิกเกอร์ขนาดเล็ก 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 ไทเทรตสารละลายในขวดก้นกลมกับสารละลายเฟอร์สแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5

นอร์แมล เมื่อใกล้ถึงจุดยุติ สารละลายในขวดก้นกลมจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวเข้ม ที่จุดนี้ค่อย ๆ เติมสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตลงไปช้า ๆ (ทีละหยด) จนกระทั่งสารละลายในขวดก้นกลม เปลี่ยนจากสีเขียวอมน้ำเงินเป็นสีน้ำตาลแกมแดง บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

8. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่างฟางข้าว และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่างฟางข้าว (ข้อ 2. – 7.) บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต

### การตรวจสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของวิธีวิเคราะห์

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

### การคำนวณ

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

โดยที่

COD = ปริมาณซีไอดี (Chemical oxygen demand) (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อกรัมของแข็งระเหย)

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

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

$N_{\text{FAS}}$  = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (นอร์แมล)

$W_{\text{solid sample}}$  = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัมของแข็งระเหย)



ภาคผนวก ค

รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว



## 1. สารแทรก (Extractives)

การกำจัดสารแทรก ทำโดยการสกัดสารแทรกออกจากฟางข้าวด้วยอะซีโตน (Acetone) โดยใช้ชุดซอกท์เลตสำหรับการสกัดและคำนวณหาปริมาณสารแทรกที่หายไปหลังจากการสกัด ตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุใน Ayeni et al. (2013)

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.01 กรัม
3. เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Dispenser)
4. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส
5. เตาทลุ้มให้ความร้อน (Multi heating mantles)
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. โถดูดความชื้น (Desiccator)
11. ปีกเกอร์ (Beaker)

### สารเคมี

อะซีโตน (Acetone)

- อะซีโตน (Acetone,  $C_3H_6O$ ) เกรดงานวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9

### วิธีวิเคราะห์

1. อบหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Thimble) ที่ระดับอุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด และบันทึกน้ำหนัก

2. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวขนาด 0.5 – 2 มิลลิเมตร จำนวน 5.0 กรัม ใส่ลงในหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด บันทึกรน้ำหนัก
3. อบหลอดกระดาษกรองที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ ที่ระดับอุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ บันทึกรน้ำหนัก
4. นำหลอดกระดาษกรองที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ในซอกท์เลต (Soxhlet) แล้วนำไปต่อกับเครื่องควบแน่น (Condenser)
5. เปิดน้ำเข้าชุดกลั่นแบบไหลกลับ
6. เติมอะซีโตน จำนวน 300 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
7. ต่อขวดก้นกลมเข้ากับซอกท์เลตและวางขวดก้นกลมบนเตาให้ความร้อน เปิดเตาให้ความร้อนโดยควบคุมให้มีระยะเวลาของการไหลย้อนกลับของอะซีโตนประมาณ 6 – 10 รอบต่อชั่วโมง
8. ทำการสกัดเป็นระยะเวลานาน 8 ชั่วโมง
9. ปิดเตาให้ความร้อน นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ออกจากซอกท์เลตใส่ลงในปีกเกอร์ที่เตรียมไว้ ปล่อยให้ในตู้ดูดควันจนตัวอย่างแห้ง
10. นำหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัดที่มีฟางข้าวบรรจุอยู่ไปอบที่ระดับอุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักหลอดกระดาษกรองและตัวอย่างในหลอดกระดาษกรอง บันทึกรน้ำหนัก
11. นำตัวอย่างเก็บลงในถุงซิปล็อก เพื่อรอการวิเคราะห์เอมิเซลลูโลส และลิกนินต่อไป

#### การคำนวณ

$$\% \text{Extractives (\%EXT)} = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \times 100$$

โดยที่

$W_0$  = น้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง (กรัม)

$W_1$  = น้ำหนักฟางข้าวหลังการสกัด (กรัม)

## 2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

การวิเคราะห์เฮมิเซลลูโลส ทำโดยต้มย่อยตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ คำนวณปริมาณเฮมิเซลลูโลสจากน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปหลังจากการต้มย่อยตัวอย่าง ตามวิธี วิเคราะห์ที่ระบุใน S. Li, Xu, Liu, Yang, and Lu (2004)

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
4. ชุดกรอง (Filtration setup) ประกอบด้วย
  - ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
  - ขวดลดความดัน (Suction flask)
  - แผ่นยางรองครุชชีเบลแก้ว (Rubber filter adapter for fritted glass crucible)
5. ครุชชีเบลแก้ว (Fritted glass crucible)
6. โถดูดความชื้น (Desiccator)
7. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
8. กระบอกตวง (Cylinder)
9. ปีกเกอร์ (Beaker)

### สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) 0.5 นอร์แมล

- ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกที่มีฝาเกลียว

### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวอบแห้งที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free biomass) (วิธีเตรียม ดูได้จากวิธีวิเคราะห์สารแทรก) จำนวน 1.0 กรัม บันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_5$  ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ จำนวน 150 มิลลิลิตร ลงในขวดชมพู
3. ต้มสารละลายตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที
4. หลังจากต้มตัวอย่าง กรองตัวอย่างทันทีผ่านครู่ชีเบลแก้วที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงและทราบน้ำหนัก ( $W_C$ ) ลงในขวดลดความดัน จากนั้นล้างตัวอย่างในครู่ชีเบลแก้วด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิสูงหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งน้ำกรองมีค่าพีเอชเป็นกลาง
5. อบครู่ชีเบลแก้วและตัวอย่าง ในตู้อบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาข้ามคืน หรือจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่
6. นำครู่ชีเบลแก้วและตัวอย่างออกจากตู้อบลมร้อน ใส่ลงในโถดูดความชื้น ปล่อยให้ครู่ชีเบลแก้วและตัวอย่างให้เย็น เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 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

$W_S$  = น้ำหนักฟางข้าวอบแห้ง (กรัม)

$W_C$  = น้ำหนักครู่ชีเบลแก้วหลังการอบ (กรัม)

$W_H$  = น้ำหนักครู่ชีเบลแก้วและตัวอย่างหลังการอบ (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 Sluiter et al. (2008)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส
3. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส
4. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดัน (Autoclave) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ  $121 \pm 3$  องศาเซลเซียส
5. เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)
6. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
7. บิวเรตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto burette)
8. ชุดกรอง (Filtration setup) ประกอบด้วย
  - ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
  - ขวดลดความดัน (Suction flask)
  - แผ่นยางรองครุชีเบิลแก้ว (Rubber filter adapter for fritted glass crucible)
9. ครุชีเบิลแก้ว (Fritted glass crucible)
10. ขวดซีรัม (Serum bottle) ขนาด 100 มิลลิลิตร
11. จุกยาง (Rubber stopper) สำหรับปิดขวดซีรัม
12. ฝาอะลูมิเนียม (Aluminum crimp cap) สำหรับปิดขวดซีรัม
13. โถดูดความชื้น (Desiccator)
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. เผาครุชิเบิลแก้วในเตาเผา ที่ระดับอุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง นำครุชิเบิลแก้วออกจากเตาเผา และใส่ลงในโถดูดความชื้น ปล่อยให้ครุชิเบิลแก้วให้เย็นในโถดูดความชื้น เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักครุชิเบิลแก้ว และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_C$

2. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวอบแห้งที่ปราศจากสารแทรก (Extractive-free biomass) (วิธีเตรียมดูได้จากวิธีวิเคราะห์สารแทรก) จำนวน 0.3 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร

3. ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น ร้อยละ 72 จำนวน 3 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ กวนผสมตัวอย่างฟางข้าวและสารละลายกรดซัลฟิวริกให้เข้ากันดีด้วยแท่งแก้วคนสาร

4. ตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง และบ่มตัวอย่างฟางข้าวในบีกเกอร์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยกวนผสมตัวอย่างฟางข้าวและสารละลายกรดซัลฟิวริกในบีกเกอร์ด้วยแท่งแก้วคนสารทุก ๆ 10 – 15 นาที ตลอดระยะเวลาการบ่ม เพื่อให้กระบวนการไฮโดรไลซิสเริ่มต้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

5. เมื่อครบระยะเวลาการบ่ม 2 ชั่วโมง ค่อย ๆ ถ่ายสารละลายตัวอย่างจากบีกเกอร์ลงในขวดซีรัม โดยการล้างด้วยน้ำกลั่น จำนวน 84 มิลลิลิตร (โดยใช้เปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้)

6. ปิดปากขวดซีรัมด้วยจุกยาง (Rubber stopper) และรัดให้แน่นด้วยฝาอะลูมิเนียม (Aluminum crimp cap) แกว่งขวดซีรัมเพื่อให้ตัวอย่างฟางข้าวในขวดซีรัมสัมผัสกับสารละลายกรดซัลฟิวริกอย่างทั่วถึง

7. นำขวดซีรัมวางลงในตะแกรงสเตนเลส และนำไปทำให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสขั้นที่สองด้วยวิธีหนึ่งด้วยไอน้ำ ที่ระดับอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ผสมในขวดซีรัมให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

8. กรองของผสมในขวดซีรัมผ่านครุชชีเบลแก้วที่ผ่านการเผาและทราบน้ำหนัก ( $W_C$ ) ลงในขวดลดความดัน

9. ถ่ายน้ำกรองจากขวดลดความดัน จำนวนประมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณลิกนินที่ละลายในกรด (Acid soluble lignin) ต่อไป ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ภายใน 6 ชั่วโมง หลังจากสิ้นสุดกระบวนการไฮโดรไลซิสขั้นที่สอง โดยปฏิบัติตามวิธีวิเคราะห์ที่ระบุในข้อที่ 16.

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

11. อบครุชชีเบลแก้วและตัวอย่าง ในตู้อบลมร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ  $105 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาข้ามคืน หรือจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่

12. นำครุชชีเบลแก้วและตัวอย่างออกจากตู้อบลมร้อน ใส่ลงในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น แก้วและตัวอย่างให้เย็น เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_L$

13. เผาครุชชีเบลแก้วและตัวอย่างในเตาเผา ที่ระดับอุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

14. นำครุชชีเบลแก้วและตัวอย่างออกจากเตาเผา และใส่ลงในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลแก้วและตัวอย่าง บันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_A$

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

16. การวิเคราะห์หาลิกนินที่ละลายในกรดด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) มีรายละเอียดดังนี้

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

16.2 หากค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกรองตัวอย่างมีค่าสูงกว่า 0.7 ให้เจือจางน้ำกรองตัวอย่างในขวดปริมาตรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จนสามารถอ่านค่าการดูดกลืนแสงได้อยู่ในช่วง 0.2 – 0.7

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

### การคำนวณ

1. ปริมาณลิกนินที่ไม่ละลายในกรดทั้งหมด (Acid insoluble lignin, AISL)

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

โดยที่

$W_C$  = น้ำหนักครุซีเบลแก้วเปล่าหลังเผา (มิลลิกรัม)

$W_L$  = น้ำหนักครุซีเบลแก้วและตัวอย่างหลังอบ (มิลลิกรัม)

$W_A$  = น้ำหนักครุซีเบลแก้วและตัวอย่างหลังเผา (มิลลิกรัม)

$W_S$  = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (มิลลิกรัม)

2. ปริมาณลิกนินที่ละลายในกรดทั้งหมด (Acid soluble lignin, ASL)

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

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

##### การคำนวณ

$$\% \text{Cellulose (\%CEL)} = 100 - (\% \text{Ash} + \% \text{EXT} + \% \text{HEM}_{\text{Total}} + \% \text{LIG}_{\text{Total}})$$

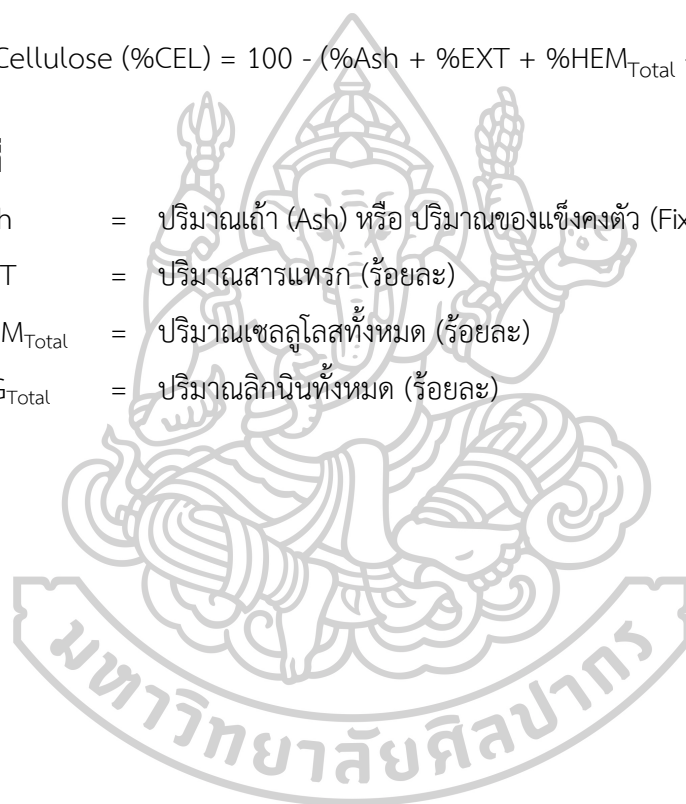
โดยที่

%Ash = ปริมาณเถ้า (Ash) หรือ ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed solid) (ร้อยละ)

%EXT = ปริมาณสารแทรก (ร้อยละ)

%HEM<sub>Total</sub> = ปริมาณเซลลูโลสทั้งหมด (ร้อยละ)

%LIG<sub>Total</sub> = ปริมาณลิกนินทั้งหมด (ร้อยละ)





ภาคผนวก ง

รายละเอียดสารเคมีและการเตรียมสารเคมีสำหรับการศึกษาค้นคว้าการผลิตก๊าซมีเทน

**สารเคมีและการเตรียมสารเคมี**  
**สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน**

1. น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน

พ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ลงในน้ำดื่มผ่านหัวกระจายก๊าซ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้ น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน

2. แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ )

3. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )

4. โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate,  $\text{NaHCO}_3$ )

5. 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

6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 นอร์แมล

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 จำนวน 122.45 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 800 มิลลิลิตร (ควรเตรียมในตู้ดูดควัน และวางปีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้ค่อนข้างร้อน) ปล่อยให้สารละลายเย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเติมสารละลายไทมอลฟทาไลน์ร้อยละ 4 จำนวน 5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น ในปีกเกอร์



## การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์และการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
2. ก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 ของบริษัท แมสเซอร์ สเตียลตี ก๊าซ จำกัด
3. ถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มเชื้อจุลินทรีย์ (Stainless steel bioreactor)

ขนาด 10 ลิตร

4. ปั๊มน้ำ (Water pump)
5. สายยาง PVC (Clear PVC Tubing)
6. ตะแกรงพลาสติก (Plastic sieve)

### สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน  
พ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ลงในน้ำดื่มผ่านหัวกระจายก๊าซ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้ น้ำดื่มปราศจากออกซิเจน
2. น้ำกลั่นที่ปราศจากออกซิเจน  
พ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ลงในน้ำกลั่นผ่านหัวกระจายก๊าซ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้ น้ำกลั่นปราศจากออกซิเจน
3. สารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ (Test medium)  
ละลายสารเคมีต่าง ๆ ตามที่ระบุในตารางที่ จ.1 ลงในน้ำกลั่น ปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปริมาตร แล้วพ่นก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 ลงในสารละลายผ่านหัวกระจายก๊าซ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้สารละลายอาหารสำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ปราศจากออกซิเจน

## ตารางที่ จ.1

## สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์

สารเคมี	จำนวน (กรัม)
โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate, $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )	0.27
ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Disodium hydrogen phosphate, $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )	0.44
แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, $\text{NH}_4\text{Cl}$ )	0.53
แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, $\text{CaCl}_2$ )	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
โซเดียมซัลไฟด์ไนโนไฮเดรต (Sodium sulfide nonahydrate, $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )	0.1

## วิธีการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

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



ภาพที่ จ.1. การล้างตะกอนจุลินทรีย์.

### วิธีการบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น (Pre-incubate)

1. นำหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการเตรียมใส่ลงในถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ขนาดความจุประมาณ 10 ลิตร ซึ่งมีลักษณะเป็นถังกวนผสม 2 ชั้น และระหว่างชั้นของถังมีการหมุนเวียนน้ำจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิสำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในถัง (ภาพที่ จ.2)

2. เติมสารละลายอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ให้หัวเชื้อจุลินทรีย์ให้หัวเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณของแข็งระเหยประมาณ 80 – 90 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร

3. ปิดฝาถังให้สนิท

4. แทนที่ช่องว่างเหนือของผสมภายในถังด้วยก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.999 เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 นาที

5. ควบคุมอุณหภูมิของการบ่มเท่ากับ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส และกวนผสมตลอดระยะเวลาการบ่ม เป็นระยะเวลา 5 – 7 วัน



ภาพที่ จ.2. ชุดถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น.



ภาคผนวก ฉ

รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของหัวเชื้อจุลินทรีย์



## 1. ระดับค่าพีเอช (pH)

การวัดระดับค่าพีเอชทำโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า (Electrometric method) ตามที่ระบุใน Rice et al. (2012) Part 4500-H<sup>+</sup> B.

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
2. ปีกเกอร์ (Beaker)

### 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. นำหัวเชื่อมจูลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์แบบไม้ออกซิเจนสำหรับบ่มหัวเชื่อมจูลินทรีย์ใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร และวัดค่าพีเอชโดยใช้เครื่องวัดพีเอช

## 2. ของแข็งรวม (Total solids)

### ของแข็งระเหย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งรวมทำโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตามวิธีที่ระบุใน Rice et al. (2012) Part 2540 B. และ Part 2540 E. และ United States Environment Protection Agency (2001) Method 1684

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) ความละเอียด 0.0001 กรัม
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
3. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส
4. เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ระดับอุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส
5. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
6. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
7. โถดูดความชื้น (Desiccator)
8. ปีกเกอร์ (Beaker)

#### วิธีวิเคราะห์

##### ค. ของแข็งรวม (Total solids)

1. เผาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 550 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเตาเผา
2. ปลอ่ยถ้วยกระเบื้องให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_{dish}$
3. ถ่ายหัวเชื้อจากถังบ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีการกวนผสมตลอดเวลา จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในถ้วยกระเบื้อง
4. นำถ้วยกระเบื้องที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ไประเหยน้ำให้แห้งบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
5. อบถ้วยกระเบื้องที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปลอ่ยให้เย็นในโถดูดความชื้น
6. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ บันทึกน้ำหนัก

7. นำถ้วยกระเบื้องที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่มาอบต่อ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

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

#### ง. ของแข็งระเหย (Volatile solids) และของแข็งคงตัว (Fixed solids)

1. นำถ้วยกระเบื้องที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่ (ก.7) เข้าเตาเผาขณะที่อยู่ในเตาเผา มีอุณหภูมิ  $550 \pm 25$  องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 1 ชั่วโมง 30 นาที
2. ปล่อยให้ถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก
3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์บรรจุอยู่มาเผาอีกครั้งหนึ่ง ที่อุณหภูมิ  $550 \pm 25$  องศาเซลเซียส จับเวลาการเผาให้ครบ 20 นาที ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

ทำซ้ำขั้นตอนการเผา (20 นาที) การปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น และการชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากกว่าร้อยละ 4 หรือ 50 มิลลิกรัม (เลือกใช้เกณฑ์ที่มีค่าน้อยกว่า) บันทึกค่าน้ำหนักเป็น  $W_{volatile}$

#### การคำนวณ

1. ของแข็งรวม (Total solids)

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

โดยที่

Total solids = ปริมาณของรวม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$W_{dish}$  = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

$W_{total}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม)

Sample volume = ปริมาตรตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

## 2. ของแข็งระเหย (Volatile solids)

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

โดยที่

Volatile solids = ปริมาณของแข็งระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

 $W_{\text{total}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม) $W_{\text{volatile}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)

Sample volume = ปริมาตรตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

## 3. ของแข็งคงตัว (Fixed solids)

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

โดยที่

Fixed solids = ปริมาณของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)

 $W_{\text{dish}}$  = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม) $W_{\text{total}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังอบ (มิลลิกรัม) $W_{\text{volatile}}$  = น้ำหนักตัวอย่างและถ้วยกระเบื้องหลังเผา (มิลลิกรัม)



ภาคผนวก ข

รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ปัจจัยบางประการ  
ที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

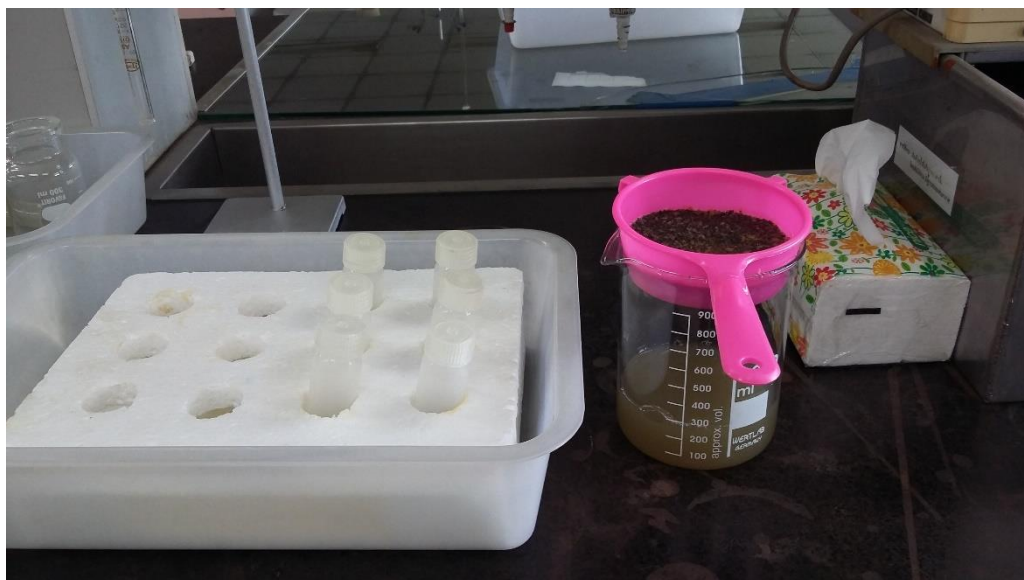
## การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญบางประการ ที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว

### 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. กระดาษกรอง GF/C

### วิธีเตรียมตัวอย่าง

1. กรองของผสมภายในขวดหมักผ่านตะแกรงพลาสติก เพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลว (ภาพที่ ช.1)
2. นำส่วนที่เป็นของเหลวมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิขณะปั่นเหวี่ยงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส
3. กรองน้ำตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง GF/C โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ (ภาพที่ ช.2)
4. เก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองใส่ขวดยาน้ำพลาสติก เพื่อรอวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะต่าง ๆ



ภาพที่ ช.1. การกรองของผสมภายในขวดหมักผ่านตะแกรงพลาสติก.



ภาพที่ ช.2. ชุดกรองสุญญากาศสำหรับกรองน้ำตัวอย่าง.

## 1. ระดับค่าพีเอช (pH)

การวัดระดับค่าพีเอชทำโดยใช้วิธี Electrometric method ตามที่ระบุใน Rice et al. (2012) Part 4500-H<sup>+</sup> B.

### เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

### 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 และแกว่งขวดหมักให้ของผสมภายในขวดผสมเข้ากันดีขณะวัดค่าพีเอช (วัสดุผสมภายในขวดหมักยังไม่ผ่านการเตรียมตัวอย่าง)



## 2. กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยใช้วิธี Esterification method ที่ดัดแปลงจาก H. Montgomery, Dymock, and Thom (1962) โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

### เครื่องมือและอุปกรณ์

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

### สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH)
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 19.2 นอร์แมล  
ดวงกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 515 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
3. สารละลายไฮดรอกซิลลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride solution) ร้อยละ 10  
ละลายไฮดรอกซิลลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride, NH<sub>2</sub>OH·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 (ควรเตรียมในตู้ดูดควัน และวางปีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้จะร้อนมาก)
5. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride sulfuric acid solution) ร้อยละ 10  
ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride, FeCl<sub>3</sub>) 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. ต้มหลอดทดลองที่บรรจุสารละลายตัวอย่างในน้ำเดือดเป็นเวลา 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 แล้วแกว่งหลอดทดลองให้สารละลายผสมเข้ากันดี เริ่มจับเวลา แล้วปิเปตน้ำกลั่นจำนวน 33.5 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดทดลอง พลิกหลอดทดลองกลับไป-มา เพื่อให้สารละลายผสมเข้ากันดี
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 495 นาโนเมตร ทันทีเมื่อครบระยะเวลา 2 นาที
7. ทำชุดควบคุม (Control) โดยปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง แต่เติมน้ำกลั่นแทนสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร (ข้อ ก 5.)

### 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 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. ปีเปตสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 0 50 100 200 400 600 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองจำนวน 2.0 มิลลิลิตร โดยปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ ตัวอย่าง (ข้อ ก 2. – ก 6.)



### 3. ความเป็นด่าง (Alkalinity)

การวิเคราะห์ความเป็นด่างใช้วิธี Titration method ตามวิธีที่ระบุใน Rice et al. (2012) Part 2320 B. ซึ่งกระทำโดยการไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก และใช้เครื่องวัดพีเอชในการบอกจุดยุติ

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
2. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
3. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
4. บิวเรต (Burette)
5. ปีกเกอร์ (Beaker)
6. กระจกนาฬิกา (Watch glass)

#### สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (Standard sulfuric acid) 0.1 นอร์มัล
  - ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 จำนวน 3 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดปรับปริมาตร สารละลายนี้ต้องการความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้ โดยปฏิบัติดังนี้
    - ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 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 และฉีดล้างหัววัดค่าพีเอชด้วยน้ำกลั่นกลับลงไปในปีกเกอร์สารละลายตัวอย่างเดิม
    - ปิดปีกเกอร์สารละลายตัวอย่างด้วยกระจกนาฬิกา ต้มสารละลายตัวอย่างให้เดือดเบา ๆ เป็นเวลา 3 – 5 นาที
    - ปล่อยให้สารละลายตัวอย่างเย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
    - ฉีดล้างกระจกนาฬิกาด้วยน้ำกลั่นกลับลงไปในปีกเกอร์สารละลายตัวอย่าง

- ไทเทรตสารละลายตัวอย่างต่อด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นประมาณ 0.1 นอร์แมล จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมีค่าพีเอชใกล้เคียง 4.5 คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{Normality (N)} = \frac{A \text{ g Na}_2\text{CO}_3}{B \text{ ml H}_2\text{SO}_4} \times \frac{\text{eq}}{53 \text{ g Na}_2\text{CO}_3} \times \frac{1000 \text{ ml}}{L}$$

โดยที่

Normality = 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

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

โดยที่

Alkalinity = ความเป็นด่าง (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)  
 A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)  
 N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (นอร์แมล)  
 ml sample = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (มิลลิลิตร)

#### 4. ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

การวิเคราะห์ปริมาณซีโอดี (COD) ในที่นี้เป็นการใช้โพแทสเซียมไดโครเมตที่มากเกินไป เป็นสารออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในสารละลายตัวอย่างภายใต้สภาวะที่เป็นกรด โดยการรีฟลักซ์แบบ ปิด (Close reflux method) และหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ โดยการเทียบสี (Colorimetric method) ด้วยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง ตามที่ระบุใน Rice et al. (2012) Part 5220 D.

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
2. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ของบริษัท HACH รุ่น DR 6000
3. เครื่องย่อยอุณหภูมิสูง (Thermoreactor) ของบริษัท Merck รุ่น TR 420
4. 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. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP)  
ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate,  $HOOC_6H_4COOK$ ) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จำนวน 2.125 กรัม ในน้ำกลั่น แล้ว

ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร ในทางปฏิบัติควรเตรียมสารละลายนี้ใหม่ ทุกสัปดาห์

ตามทฤษฎี KHP 1 มิลลิกรัม มีค่าซีไอดีเท่ากับ 1.176 มิลลิกรัมออกซิเจน และ สารละลายนี้ควรวิเคราะห์ได้ค่าซีไอดีตามทฤษฎีเท่ากับ 2,500 ไมโครกรัมออกซิเจนต่อมิลลิลิตร

## วิธีวิเคราะห์

### ค. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

#### 1. การรีฟลักซ์สารละลายตัวอย่าง

1.1 ล้างหลอดย่อยตัวอย่างและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 ก่อนการใช้งานครั้งแรกเพื่อป้องกันการปนเปื้อน

1.2 ปิเปตสารละลายตัวอย่างใส่ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง จำนวน 2.5 มิลลิลิตร และปิเปต สารละลายสำหรับการย่อยสลาย จำนวน 1.5 มิลลิลิตร

1.3 ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริก จำนวน 3.5 มิลลิลิตร โดยเติมอย่างระมัดระวัง ให้ สารละลายไหลลงไปตามผนังด้านในของหลอดย่อยตัวอย่าง เพื่อให้เกิดเป็นชั้นของสารละลายกรด ซัลฟิวริกใต้ชั้นของสารละลายตัวอย่างและสารละลายสำหรับการย่อยสลาย

1.4 ปิดฝาหลอดย่อยตัวอย่างให้แน่นหนา

1.5 ผสมของผสมในหลอดย่อยตัวอย่างให้เข้ากันดี โดยการพลิกหลอดกลับไป-มา

1.6 นำหลอดย่อยตัวอย่างไปใส่ในเครื่องย่อยอุณหภูมิสูงที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 150 องศา- เซลเซียส ทำการรีฟลักซ์เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

#### 2. การเทียบสีด้วยวิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง

2.1 ปิดเครื่องย่อย แล้วปล่อยให้หลอดย่อยตัวอย่างเย็นลงภายในเครื่องย่อยประมาณ 20 นาที หรือจนกระทั่งเครื่องย่อยมีอุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า

2.2 ผสมของผสมในหลอดย่อยตัวอย่างให้เข้ากันดี ขณะที่ของผสมภายในหลอดย่อย ยังคงอุ่นอยู่ โดยการพลิกหลอดกลับไป-มา

2.3 วางหลอดย่อยตัวอย่างลงในตะแกรงวางหลอดทดลอง ปล่อยให้เย็นจนมีอุณหภูมิ ใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

2.4 วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

2.5 ทำชุดควบคุม (Blank) โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการ วิเคราะห์ตัวอย่าง

### ง. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมชุดสารละลายมาตรฐานให้มีความเข้มข้นของซีโอดีเท่ากับ 0 50 100 200 400 600 และ 800 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม-ไฮโดรเจนพทาเลตความเข้มข้น 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

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

โดยที่

COD = ปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand) (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)

ml sample = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

mg O<sub>2</sub> in final volume = ปริมาณออกซิเจนที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัม)



## 5. ผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonium nitrogen + ammonia nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NH}_3\text{-N}$ )

การหาปริมาณผลรวมของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนทำโดยการกลั่น (Distillation) และการไทเทรต (Titration) ตามวิธีที่ระบุใน Rice et al. (2012) Part 4500-NH<sub>3</sub>

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Micro-kjeldahl distillation unit)
2. หลอดย่อยตัวอย่าง (Digestion flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ปิเปตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto pipette)
4. บิวเรตดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตรได้ (Auto burette)
5. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กแบบให้ความร้อน (Hot plate stirrer)
6. ขวดخمพู่ (Erlenmeyer flask)

### สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ (borate buffer solution)  
เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล 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 นอร์มัล  
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 240 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (ควรเตรียมในตู้ดูดควัน และวางบีกเกอร์ในอ่างน้ำเย็น เพราะสารละลายที่ได้จะร้อนมาก) เก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกฝาเกลียว
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution) 1 นอร์มัล  
ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จำนวน 40 กรัม ลงในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น
4. สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid solution) 1 นอร์มัล  
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 200 มิลลิกรัม ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 จำนวน 100 มิลลิลิตร และละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue,  $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ) จำนวน 100 มิลลิกรัม ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 จำนวน 50 มิลลิลิตร แล้วผสมสารละลายทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน (สารละลายนี้ต้องเตรียมใหม่ทุกเดือน)

#### 6. สารละลายกรดบอริก (Boric acid)

ละลายกรดบอริก (Boric acid,  $H_3BO_3$ ) จำนวน 20 กรัม ลงในน้ำกลั่น ตั้งบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กแบบให้ความร้อน เปิดความร้อนให้กรดบอริกละลาย ปล่อยให้เย็น จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ผสม จำนวน 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร

#### 7. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (Standard sulfuric acid) 0.1 นอร์แมล

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

- 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 และฉีกล้างหัววัดค่าพีเอชด้วยน้ำกลั่นกลับลงไปบีกเกอร์สารละลายตัวอย่างเดิม

- ปิดบีกเกอร์สารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษฟิวส์ ต้มสารละลายตัวอย่างให้เดือดเบา ๆ เป็นเวลา 3 – 5 นาที

- ปล่อยให้สารละลายตัวอย่างเย็นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง
- ฉีกล้างกระดาษฟิวส์ด้วยน้ำกลั่นกลับลงไปบีกเกอร์สารละลายตัวอย่าง
- ไทเทรตสารละลายตัวอย่างต่อด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นประมาณ 0.1 นอร์แมล จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างมีค่าพีเอชใกล้เคียง 4.5 คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{Normality (N)} = \frac{A \text{ g } Na_2CO_3}{B \text{ ml } H_2SO_4} \times \frac{\text{eq}}{53 \text{ g } Na_2CO_3} \times \frac{1000 \text{ ml}}{L}$$

โดยที่

Normality = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริก (นอร์แมล)

A = น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต (กรัม)

B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

### วิธีวิเคราะห์

1. จัดเตรียมเครื่องกลั่นไนโตรเจนให้พร้อมใช้งาน
2. ปิเปตสารละลายกรดบอริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ปรับค่าพีเอชให้เป็นกลางแล้ว จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง (Digestion flask)
4. เติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ จำนวน 3 มิลลิลิตร และปรับพีเอชให้เป็น 9.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์แมล (จำนวน 3 หยด)
5. นำหลอดย่อยตัวอย่างที่บรรจุสารละลายตัวอย่างไปกลั่นด้วยเครื่องกลั่นไนโตรเจน โดยใช้สารละลายกรดบอริกจากข้อ 2 ดักจับก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้น กลั่นจนได้สารละลายจากการกลั่นประมาณ 75 มิลลิลิตร
6. ไทเทรตสารละลายในขวดชมพูที่กลั่นได้ ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์แมล เมื่อถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีม่วงอ่อน (Pale lavender)
7. ทำชุดควบคุม (Blank) โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง และปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง

### การคำนวณ

$$\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NH}_3\text{-N (mg/L)} = \frac{(A - B) \times N \times 14 \times 1000}{\text{ml sample}}$$

โดยที่

$\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NH}_3\text{-N}$  = ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ml sample = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

A = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

- B = ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตกับชุดควบคุม  
(มิลลิลิตร)
- N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต  
(นอร์แมล)





ภาคผนวก ซ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว

## ตารางที่ ซ.1

## ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว

สถานะ การปรับสภาพ	การ วิเคราะห์ซ้ำ	mf	TS (%)	VS (%)	Ash (%)	OC (%)	TN (%)	TP (%)	COD (mg O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> VS)	C : N ratio
Untreated	1	1.08	91.95	86.73	13.27	54.06	0.51	0.008	1125	108 : 1
	2		92.04	86.56	13.44	54.63	0.52	0.009	1110	
	3		92.03	86.73	13.27	55.38	0.49	0.008	1137	
5%-3d	1	1.07	93.66	84.02	15.98	55.03	0.34	0.003	1118	161 : 1
	2		93.74	84.04	15.96	55.14	0.34	0.003	1093	
	3		93.82	84.16	15.84	55.10	0.34	0.002	1112	
5%-6d	1	1.09	91.33	84.42	15.58	55.39	0.33	0.003	1102	165 : 1
	2		91.35	84.56	15.44	54.88	0.33	0.003	1112	
	3		91.70	84.62	15.38	54.54	0.34	0.003	1142	
5%-12d	1	1.07	93.37	85.26	14.74	55.74	0.30	0.002	1124	185 : 1
	2		93.10	85.24	14.76	55.07	0.30	0.002	1141	
	3		93.50	85.22	14.78	54.75	0.30	0.002	1123	
10%-3d	1	1.08	92.85	83.96	16.04	53.47	0.33	0.004	1135	163 : 1
	2		93.10	83.93	16.07	54.18	0.33	0.004	1142	
	3		93.20	83.92	16.08	54.63	0.33	0.003	1130	
10%-6d	1	1.07	93.02	84.57	15.43	55.96	0.32	0.003	1126	175 : 1
	2		93.31	84.72	15.28	55.48	0.32	0.003	1128	
	3		93.13	84.61	15.39	54.47	0.31	0.003	1124	
10%-12d	1	1.08	92.18	85.42	14.58	55.10	0.28	0.003	1121	198 : 1
	2		92.31	85.46	14.54	54.81	0.28	0.002	1143	
	3		92.23	85.39	14.61	54.72	0.27	0.002	1124	
15%-3d	1	1.07	93.83	84.03	15.97	54.14	0.31	0.003	1118	174 : 1
	2		93.32	84.20	15.80	52.94	0.30	0.003	1126	
	3		93.92	83.99	16.01	54.04	0.32	0.003	1122	
15%-6d	1	1.07	93.06	85.14	14.86	54.61	0.28	0.002	1131	201 : 1
	2		92.97	85.04	14.96	54.10	0.27	0.002	1122	
	3		93.02	85.08	14.92	54.87	0.27	0.002	1122	
15%-12d	1	1.08	91.13	84.73	15.27	51.79	0.27	0.002	1121	201 : 1
	2		91.28	84.78	15.22	53.21	0.26	0.002	1117	
	3		91.50	84.89	15.11	53.79	0.26	0.002	1141	

## ตารางที่ ซ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของฟางข้าว (ต่อ)

สถานะ การปรับสภาพ	การ วิเคราะห์ซ้ำ	mf	TS (%)	VS (%)	Ash (%)	OC (%)	TN (%)	TP (%)	COD (mg O <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> VS)	C : N ratio
5%-70C	1	1.08	93.29	84.61	15.39	55.27	0.32	0.003	1130	174 : 1
	2		93.45	84.73	15.27	54.07	0.32	0.003	1128	
	3		93.40	84.74	15.26	57.38	0.32	0.002	1120	
5%-80C	1	1.07	93.34	84.16	15.84	55.61	0.32	0.004	1116	171 : 1
	2		93.37	84.04	15.96	50.76	0.32	0.004	1130	
	3		93.46	84.16	15.84	54.30	0.31	0.004	1119	
5%-90C	1	1.10	89.59	85.81	14.19	54.67	0.22	0.003	1141	250 : 1
	2		89.74	85.72	14.28	53.96	0.23	0.004	1160	
	3		89.72	85.57	14.43	56.27	0.22	0.004	1125	
10%-70C	1	1.08	92.32	84.15	15.85	53.99	0.34	0.003	1144	152 : 1
	2		92.74	84.09	15.91	53.43	0.36	0.004	1126	
	3		92.82	84.21	15.79	54.29	0.36	0.003	1124	
10%-80C	1	1.07	94.46	82.71	17.29	53.32	0.29	0.005	1108	186 : 1
	2		94.61	82.52	17.48	53.04	0.28	0.005	1123	
	3		94.50	82.47	17.53	53.62	0.28	0.005	1114	
10%-90C	1	1.07	94.27	84.50	15.50	54.36	0.22	0.003	1121	256 : 1
	2		94.24	84.56	15.44	55.06	0.21	0.003	1131	
	3		94.15	84.75	15.25	55.14	0.21	0.003	1144	
15%-70C	1	1.07	94.70	83.42	16.58	53.95	0.32	0.004	1081	169 : 1
	2		94.77	83.42	16.58	53.76	0.32	0.004	1088	
	3		95.82	83.31	16.69	54.36	0.32	0.004	1079	
15%-80C	1	1.07	94.70	85.54	14.46	56.16	0.25	0.003	1175	223 : 1
	2		94.69	85.24	14.76	55.26	0.25	0.004	1147	
	3		94.50	85.64	14.36	56.77	0.25	0.003	1157	
15%-90C	1	1.07	94.52	83.82	16.18	54.22	0.21	0.003	1132	256 : 1
	2		94.09	83.69	16.31	54.82	0.22	0.003	1155	
	3		94.36	83.94	16.06	55.54	0.22	0.003	1143	



ภาคผนวก ฅ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว



## ตารางที่ ฅ.1

## ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว

สภาวะการปรับสภาพ	การวิเคราะห์ซ้ำ	%CEL	%EXT	%HEM	%AISL	%ASL	%LIG
Untreated	1	25.15	1.09	47.71	12.30	0.04	12.34
	2		1.30	48.38	12.58	0.05	12.63
	3		1.25	47.29	12.52	0.05	12.56
5%-3d	1	39.94	0.50	34.74	8.77	0.03	8.81
	2		0.44	34.96	8.70	0.04	8.74
	3		0.44	34.97	8.76	0.04	8.79
5%-6d	1	41.85	0.44	32.88	8.54	0.03	8.57
	2		0.46	33.83	8.54	0.03	8.58
	3		0.30	34.46	8.48	0.04	8.51
5%-12d	1	44.73	0.73	32.06	7.93	0.04	7.96
	2		0.76	31.70	7.87	0.04	7.91
	3		0.75	31.68	7.94	0.04	7.98
10%-3d	1	40.81	1.02	33.66	8.24	0.04	8.28
	2		0.86	33.48	8.36	0.04	8.40
	3		0.80	34.45	8.40	0.04	8.44
10%-6d	1	43.47	1.01	32.76	8.00	0.04	8.04
	2		0.98	31.45	8.29	0.04	8.34
	3		0.99	31.61	8.25	0.04	8.29
10%-12d	1	44.55	0.94	31.19	7.81	0.04	7.85
	2		0.83	31.09	8.14	0.04	8.18
	3		0.63	33.86	8.00	0.04	8.04
15%-3d	1	40.03	0.88	35.93	8.83	0.03	8.86
	2		0.79	34.26	8.70	0.03	8.74
	3		0.69	33.35	8.60	0.04	8.63
15%-6d	1	42.23	0.67	33.90	7.97	0.04	8.01
	2		0.58	33.29	8.58	0.04	8.62
	3		0.40	34.40	8.67	0.04	8.71
15%-12d	1	43.84	0.61	32.44	8.13	0.03	8.17
	2		0.58	32.93	8.19	0.03	8.23
	3		0.53	31.12	8.23	0.04	8.27

## ตารางที่ ฅ.1

## ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของฟางข้าว (ต่อ)

สภาวะการปรับสภาพ	การวิเคราะห์ซ้ำ	%CEL	%EXT	%HEM	%AISL	%ASL	%LIG
5%-70C	1	39.74	0.77	34.46	9.62	0.04	9.65
	2		0.57	35.16	9.29	0.04	9.32
	3		0.49	35.04	9.36	0.04	9.40
5%-80C	1	40.67	0.33	33.27	9.68	0.03	9.71
	2		0.48	33.86	9.01	0.03	9.04
	3		0.55	33.56	9.51	0.03	9.54
5%-90C	1	45.80	0.78	29.33	9.36	0.03	9.39
	2		0.97	29.71	9.50	0.03	9.53
	3		0.87	29.46	9.63	0.03	9.66
10%-70C	1	39.07	0.96	34.45	9.56	0.03	9.59
	2		0.95	34.61	9.49	0.03	9.53
	3		1.03	34.38	9.72	0.03	9.75
10%-80C	1	39.90	1.76	32.12	8.68	0.04	8.72
	2		1.41	32.36	8.74	0.04	8.78
	3		1.80	32.07	8.96	0.04	8.99
10%-90C	1	44.00	1.05	29.74	9.24	0.03	9.27
	2		1.29	29.68	9.40	0.03	9.43
	3		1.34	30.44	9.54	0.03	9.57
15%-70C	1	39.15	0.00	33.94	9.65	0.04	9.68
	2		0.00	35.85	10.02	0.04	10.06
	3		0.00	33.70	10.03	0.04	10.06
15%-80C	1	44.52	0.00	31.91	9.72	0.04	9.76
	2		0.00	32.73	9.53	0.04	9.57
	3		0.00	31.73	9.57	0.04	9.61
15%-90C	1	44.78	0.44	29.21	9.00	0.04	9.04
	2		0.50	29.23	9.77	0.04	9.81
	3		0.63	29.03	9.17	0.03	9.21



ภาคผนวก ญ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญบางประการ

ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของฟางข้าว

ตารางที่ ญ.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช

ชุดการทดลอง	ค่าพีเอช						
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30
Untreated	7.23	7.24	7.26	7.09	7.13	7.14	7.15
5%-3d	7.54	6.96	6.76	6.93	7.11	7.19	7.25
5%-6d	7.46	6.92	6.90	6.89	7.11	7.14	7.30
5%-12d	7.50	6.99	6.73	6.92	7.11	7.21	7.26
10%-3d	7.78	7.08	6.92	7.08	7.17	7.24	7.29
10%-6d	7.56	6.98	6.76	6.91	7.11	7.18	7.24
10%-12d	7.57	7.02	6.70	6.90	7.09	7.17	7.25
15%-3d	7.52	6.94	6.83	6.92	7.07	7.25	7.29
15%-6d	7.53	6.87	6.86	6.87	7.13	7.22	7.30
15%-12d	7.56	7.06	6.84	6.90	7.10	7.25	7.32
5%-70C	7.52	6.80	6.88	6.90	7.08	7.16	7.30
5%-80C	7.48	6.83	6.79	6.91	7.11	7.22	7.31
5%-90C	7.44	6.86	6.84	6.88	7.10	7.23	7.32
10%-70C	7.38	6.92	6.78	6.89	7.08	7.23	7.34
10%-80C	7.38	6.94	6.77	6.90	7.07	7.21	7.33
10%-90C	7.52	6.9	6.86	6.82	7.07	7.15	7.41
15%-70C	7.50	6.94	6.88	6.91	7.05	7.23	7.34
15%-80C	7.76	7.12	6.87	6.97	7.17	7.28	7.30
15%-90C	7.51	6.96	6.91	6.89	7.14	7.21	7.34

ตารางที่ ญ.2

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มข้น

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)						
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30
Untreated	1	5,085.25	5,398.52	5,755.01	5,866.76	6,128.58	6,143.09	6,098.55
	2	5,094.07	5,346.10	5,755.01	5,901.73	6,137.35	6,125.54	6,089.61
5%-3d	1	5,000.24	5,254.03	4,583.26	4,850.99	5,304.44	5,517.61	5,840.91
	2	5,000.24	5,236.13	4,601.10	4,824.19	5,322.24	5,464.73	5,736.76
5%-6d	1	5,352.83	5,294.39	5,229.68	5,150.25	5,638.72	5,712.25	6,184.26
	2	5,335.81	5,285.92	5,263.75	5,124.75	5,613.05	5,687.98	6,151.50
5%-12d	1	5,062.19	5,101.87	4,511.93	4,618.71	5,224.34	5,596.94	5,693.37
	2	5,044.49	5,101.87	4,458.43	4,708.05	5,286.64	5,605.75	5,623.94
10%-3d	1	5,076.44	5,188.87	4,773.94	5,184.78	5,418.40	5,563.88	5,812.40
	2	5,085.25	5,145.19	4,800.22	5,245.98	5,400.87	5,537.55	5,722.98
10%-6d	1	4,955.99	5,021.31	4,565.43	4,725.91	5,251.04	5,341.33	5,797.51
	2	4,982.54	5,066.06	4,583.26	4,743.78	5,277.74	5,332.51	5,745.44
10%-12d	1	4,929.44	5,066.06	4,511.93	4,600.84	5,064.14	5,535.24	5,762.80
	2	4,920.59	5,075.02	4,511.93	4,645.51	5,073.04	5,535.24	5,693.37

ตารางที่ ญ.2

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเป็นต่าง (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
15%-3d	1	5,326.88	5,094.73	4,729.95	4,813.81	5,192.56	5,817.28	6,066.88			
	2	5,318.19	5,111.74	4,772.11	4,755.00	5,192.56	5,834.67	6,092.80			
15%-6d	1	5,292.12	4,890.60	5,033.48	4,906.22	5,387.71	5,765.10	5,271.79			
	2	5,318.19	4,916.12	4,974.46	4,906.22	5,396.19	5,765.10	5,297.71			
15%-12d	1	5,300.81	5,120.25	4,738.39	4,755.00	5,362.25	5,617.28	5,807.61			
	2	5,335.57	5,145.77	4,788.97	4,771.80	5,455.58	5,660.76	5,833.53			
5%-70C	1	5,318.19	4,737.51	4,721.52	4,763.40	5,251.95	5,660.76	5,807.61			
	2	5,318.19	4,763.02	4,696.23	4,721.40	5,268.92	5,669.45	5,842.18			
5%-80C	1	5,158.49	4,738.21	4,719.66	4,776.66	5,337.65	5,564.93	5,711.81			
	2	5,278.45	4,721.01	4,711.23	4,793.36	5,370.80	5,590.23	5,753.50			
5%-90C	1	5,107.07	4,643.61	4,770.22	4,701.50	5,470.26	5,531.21	5,645.10			
	2	5,021.38	4,660.81	4,795.51	4,676.45	5,345.93	5,564.93	5,653.44			

ตารางที่ ญ.2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มข้น (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
10%-70C	1	5,072.80	5,021.98	4,685.95	4,693.15	5,180.17	5,581.80	5,636.77			
	2	4,927.12	5,030.58	4,711.23	4,684.80	5,271.34	5,598.66	5,653.44			
10%-80C	1	4,961.40	5,150.97	4,728.08	4,776.66	5,229.90	5,581.80	5,778.52			
	2	5,004.24	5,193.97	4,744.94	4,793.36	5,229.90	5,581.80	5,786.86			
10%-90C	1	5,327.30	5,175.80	5,135.99	5,175.75	5,690.06	4,984.06	6,110.54			
	2	5,301.77	5,184.27	5,170.06	5,133.25	5,732.84	5,153.97	6,069.59			
15%-70C	1	5,293.26	5,268.98	5,118.95	5,252.24	5,587.38	5,776.98	5,807.47			
	2	5,267.73	5,268.98	5,127.47	5,209.74	5,715.73	5,736.52	5,832.05			
15%-80C	1	5,094.07	5,031.63	4,668.83	4,800.07	5,374.56	5,493.68	5,830.29			
	2	5,094.07	5,022.89	4,660.07	4,826.30	5,374.56	5,484.90	5,776.64			
15%-90C	1	5,293.26	5,421.46	5,076.37	5,252.24	5,768.89	5,768.89	6,151.50			
	2	5,310.28	5,421.46	5,101.92	5,260.73	5,754.32	5,754.32	6,094.16			

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหย

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมกรดต่อซีดีทีแอลลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
Untreated	1	366.23	128.43	162.17	258.31	228.75	235.85	201.17			
	2	373.61	109.81	175.66	258.31	236.04	214.41	195.01			
5%-3d	1	77.17	84.63	146.86	123.88	132.95	163.84	58.03			
	2	93.10	109.46	135.00	130.22	125.95	142.41	63.79			
5%-6d	1	66.98	86.94	88.00	135.69	84.36	124.78	103.94			
	2	43.62	82.09	85.67	106.67	86.59	140.97	101.50			
5%-12d	1	82.15	57.90	112.26	115.43	148.94	96.27	63.79			
	2	66.23	13.98	127.09	121.77	130.95	76.49	46.51			
10%-3d	1	55.01	105.67	159.27	165.68	139.23	144.49	94.42			
	2	41.48	103.60	127.47	187.87	142.35	150.08	107.77			
10%-6d	1	43.34	36.89	131.04	119.65	129.95	97.92	36.92			
	2	62.25	37.85	119.18	110.14	153.93	79.79	46.51			
10%-12d	1	53.29	35.94	100.40	125.99	142.94	74.84	48.43			
	2	43.34	36.89	48.99	127.05	143.94	92.97	42.68			



ตารางที่ ญ.3

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหย (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมกรดอะซิติคต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
15%-3d	1	63.66	124.49	87.91	136.94	119.43	114.96	121.90			
	2	89.05	128.75	105.05	158.62	123.85	100.10	135.89			
15%-6d	1	84.43	147.95	92.20	128.28	130.48	159.72	82.27			
	2	59.04	128.75	98.62	110.94	128.27	153.14	124.23			
15%-12d	1	45.19	101.02	109.34	136.94	119.43	117.24	188.22			
	2	22.11	98.89	115.76	91.44	132.69	138.22	155.33			
5%-70C	1	24.42	162.88	132.90	110.94	141.53	108.59	142.18			
	2	19.80	139.41	100.77	130.44	150.37	95.86	166.29			
5%-80C	1	80.79	126.54	171.74	136.64	166.15	146.76	132.65			
	2	80.79	142.36	167.22	138.86	134.05	129.93	144.30			
5%-90C	1	61.06	153.66	128.80	141.08	115.70	146.76	116.34			
	2	82.98	162.70	144.62	141.08	161.56	129.93	114.01			

ตารางที่ ญ.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการดัดไขมันระเหย (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	การดัดไขมันระเหย (มิลลิกรัมการดัดต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
10%-70C	1	102.71	94.91	158.18	141.08	166.15	115.50	146.63			
	2	85.18	85.87	162.70	147.75	173.03	139.55	127.99			
10%-80C	1	78.60	99.43	131.06	96.66	156.98	105.88	55.77			
	2	89.56	97.17	126.54	96.66	143.22	105.88	72.08			
10%-90C	1	71.06	86.94	50.88	49.90	106.67	78.50	64.91			
	2	42.56	84.51	66.50	59.27	122.30	97.01	69.79			
15%-70C	1	90.06	79.67	132.39	135.69	133.46	131.72	74.67			
	2	66.31	77.24	109.03	151.31	122.30	113.21	91.74			
15%-80C	1	42.71	102.57	123.61	157.00	120.49	121.18	76.98			
	2	57.47	86.02	125.54	174.36	233.96	90.42	83.13			
15%-90C	1	120.93	36.05	85.67	131.83	169.17	122.46	81.99			
	2	116.18	36.05	113.70	134.17	158.01	138.66	108.82			

ตารางที่ ๔.4

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียในไนโตรเจนและแอมโมเนียในไนโตรเจน

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	แอมโมเนียในไนโตรเจนและแอมโมเนียในไนโตรเจน (มิลลิกรัมแอมโมเนียในไนโตรเจนต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
Untreated	1	843.85	920.89	974.94	991.49	1,045.80	1,069.78	1,114.51			
	2	836.51	924.56	982.29	1,002.51	1,060.53	1,080.96	1,144.32			
5%-3d	1	854.91	890.95	719.05	792.46	945.72	1,046.12	1,108.12			
	2	854.91	898.47	719.05	796.20	968.15	1,064.64	1,108.12			
5%-6d	1	911.43	900.13	930.10	856.68	1,006.24	1,050.05	1,152.48			
	2	936.45	871.67	880.02	863.81	984.68	1,070.44	1,166.25			
5%-12d	1	866.06	872.15	704.07	765.44	949.46	1,042.42	1,078.96			
	2	869.78	875.91	707.82	765.44	941.98	1,046.12	1,068.03			
10%-3d	1	851.18	895.21	761.55	885.00	942.70	1,006.41	1,062.32			
	2	851.18	891.54	754.20	888.67	957.43	1,013.86	1,066.05			
10%-6d	1	858.63	845.84	726.55	772.94	956.94	994.28	1,089.90			
	2	858.63	849.60	730.29	772.94	941.98	994.28	1,097.19			
10%-12d	1	858.63	853.35	707.82	754.18	893.39	1,027.61	1,104.48			
	2	854.91	857.11	719.05	754.18	893.39	1,023.91	1,093.54			

ตารางที่ ญ.4

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	แอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร)										
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30				
15%-3d	1	901.49	882.35	775.51	776.26	894.44	1,040.85	1,107.08				
	2	897.84	878.78	782.59	776.26	887.32	1,055.46	1,139.74				
15%-6d	1	905.13	885.92	810.92	804.49	969.28	1,033.54	976.40				
	2	890.54	871.63	814.46	808.01	969.28	1,048.15	972.77				
15%-12d	1	897.84	878.78	754.26	762.14	958.59	1,026.24	1,074.41				
	2	890.54	871.63	764.89	779.79	955.02	1,037.20	1,070.78				
5%-70C	1	897.84	878.78	757.80	772.73	901.57	1,015.28	1,078.04				
	2	890.54	871.63	768.43	772.73	919.39	1,029.89	1,081.67				
5%-80C	1	831.36	729.56	711.49	750.57	905.08	977.40	1,026.12				
	2	845.75	740.40	725.65	733.03	894.64	995.11	1,033.13				
5%-90C	1	824.16	725.95	729.19	719.00	905.08	980.95	1,012.12				
	2	824.16	736.79	736.27	719.00	919.00	991.57	1,026.12				

ตารางที่ ๔.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	แอมโมเนียมไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน (มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
10%-70C	1	831.36	823.47	725.65	740.05	887.67	998.65	1,019.12			
	2	831.36	837.91	732.73	722.51	894.64	1,012.82	1,029.63			
10%-80C	1	827.76	845.14	725.65	740.05	880.71	998.65	1,040.13			
	2	824.16	848.75	722.11	729.53	884.19	1,005.74	1,012.12			
10%-90C	1	925.72	857.44	872.86	870.95	1,056.55	1,124.81	1,152.48			
	2	932.87	875.23	887.17	870.95	1,034.99	1,012.67	1,152.48			
15%-70C	1	922.15	907.25	854.98	870.95	1,017.02	1,063.64	1,100.88			
	2	929.30	907.25	862.13	874.52	984.68	1,063.64	1,104.32			
15%-80C	1	847.51	865.86	743.16	796.86	942.70	1,010.14	1,062.32			
	2	843.85	865.86	743.16	804.21	935.33	1,017.59	1,080.96			
15%-90C	1	932.87	942.83	865.71	892.37	1,142.80	1,063.64	1,149.04			
	2	932.87	939.27	865.71	906.65	1,070.93	1,046.65	1,155.92			

ตารางที่ ญ.5

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอต์ละลาย

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ซีโอต์ละลาย (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)						
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30
Untreated	วิเคราะห์ซ้ำ	1,422.64	732.84	726.80	955.90	1,138.78	981.47	1,058.42
	1	1,422.64	732.84	726.80	955.90	1,138.78	981.47	1,058.42
	2	1,410.31	758.64	701.80	962.28	1,132.66	981.47	1,083.30
5%-3d	1	865.19	635.04	816.07	793.72	854.19	840.52	881.20
	2	834.22	641.41	822.43	687.60	816.42	931.82	894.10
5%-6d	1	773.47	803.40	886.33	1,036.01	1,013.83	1,048.76	1,134.77
	2	838.90	854.43	892.96	1,036.01	1,060.92	984.92	1,329.84
5%-12d	1	580.28	520.42	822.43	756.26	684.22	749.22	797.34
	2	574.08	565.00	879.74	706.32	759.76	801.40	829.59
10%-3d	1	497.31	558.69	826.77	764.52	918.33	759.95	772.30
	2	497.31	532.89	864.26	809.17	906.08	766.10	809.62
10%-6d	1	598.86	526.79	771.50	818.69	665.34	670.97	758.64
	2	586.47	526.79	790.60	806.20	677.93	651.40	894.10
10%-12d	1	536.92	482.21	714.19	887.36	810.12	736.18	758.64
	2	530.73	469.48	733.29	812.45	784.94	742.70	719.94

ตารางที่ ญ.5

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดีละลาย (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ซีโอดีละลาย (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)								
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30		
15%-3d	1	754.00	707.94	662.60	845.48	710.97	821.37	801.66		
	2	766.93	721.04	662.60	864.89	756.67	775.37	841.09		
15%-6d	1	650.53	694.83	702.07	776.25	782.78	749.08	709.65		
	2	657.00	681.72	721.81	821.94	795.83	768.80	716.22		
15%-12d	1	579.40	557.20	807.33	774.33	789.30	795.08	808.23		
	2	572.93	550.65	846.80	774.33	776.25	821.37	814.80		
5%-70C	1	631.13	858.67	879.69	691.39	704.45	709.65	887.10		
	2	631.13	852.12	859.95	697.92	710.97	762.22	860.81		
5%-80C	1	666.05	1,010.15	1,048.85	1,254.60	1,115.13	1,081.70	1,157.78		
	2	699.35	957.15	1,149.55	1,148.12	1,265.83	1,095.06	1,105.29		
5%-90C	1	639.40	1,102.90	1,048.85	1,208.01	1,187.21	1,054.99	993.75		
	2	659.38	990.28	1,115.98	1,274.56	1,193.76	1,041.64	1,079.04		

ตารางที่ ญ.5

ข้อมูลผลกำไรวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีไอดีละลาย (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ซีไอดีละลาย (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)									
		วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 8	วันที่ 16	วันที่ 24	วันที่ 30			
10%-70C	1	745.97	712.02	1,136.12	1,181.39	1,174.10	1,101.74	1,164.34			
	2	765.95	745.14	1,156.26	1,181.39	1,187.21	1,221.93	1,059.36			
10%-80C	1	725.99	771.64	975.01	1,094.88	1,134.79	994.89	1,098.73			
	2	725.99	738.52	921.30	1,121.50	1,062.71	954.83	1,052.80			
10%-90C	1	848.05	848.05	977.76	887.14	892.77	870.00	1,089.26			
	2	790.64	854.43	893.61	1,003.65	933.12	940.23	1,173.79			
15%-70C	1	819.27	841.67	1125.17	1,191.36	1,202.16	1,061.53	1,173.79			
	2	799.64	835.29	1025.65	1,152.52	1,114.72	1,055.14	1,167.29			
15%-80C	1	528.15	532.89	783.03	866.59	857.09	846.09	790.96			
	2	552.83	552.24	801.78	898.49	869.34	858.40	809.62			
15%-90C	1	812.73	739.61	1,111.90	1,100.74	1,108.00	1,048.76	1,173.79			
	2	760.38	797.02	1,105.27	1,249.61	1,175.26	997.69	1,193.29			



ตารางที่ ๖.๖

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์ซ้ำ	ของแข็งรวม (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งระเหย (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งคงตัว (กรัมต่อลิตร)	
		วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30
Untreated	1	49.45	37.80	39.62	28.28	9.83	9.52
	2	50.48	38.55	40.41	28.96	10.07	9.59
	3	52.82	37.80	42.26	28.35	10.56	9.45
5%-3d	1	53.07	35.54	43.03	25.72	10.04	9.82
	2	51.81	37.64	42.03	26.65	9.78	10.99
	3	51.52	36.12	41.78	26.15	9.74	9.97
5%-6d	1	53.67	35.56	43.16	25.47	10.09	10.51
	2	52.46	35.24	42.22	25.54	9.70	10.24
	3	53.90	35.95	43.39	25.62	10.33	10.51
5%-12d	1	51.14	34.28	41.64	24.91	9.50	9.37
	2	52.29	35.14	42.62	25.54	9.67	9.60
	3	53.42	32.89	43.53	23.88	9.89	9.01
10%-3d	1	52.15	34.82	41.88	25.48	10.27	9.34
	2	52.57	37.12	42.21	27.24	10.36	9.88
	3	51.66	36.44	41.50	26.71	10.16	9.73

ตารางที่ ๖.๖

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ของแข็งรวม (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งระเหย (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งคงตัว (กรัมต่อลิตร)	
		วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30
10%-6d	1	53.59	33.99	43.35	24.73	10.24	9.26
	2	54.01	34.63	43.70	25.19	10.31	9.44
	3	53.56	36.08	43.25	26.25	10.31	9.83
10%-12d	1	50.30	35.64	40.70	25.92	9.60	9.72
	2	53.45	36.43	43.25	26.48	10.20	9.95
	3	51.04	36.64	41.29	26.62	9.75	10.02
15%-3d	1	45.75	34.41	36.58	24.44	9.17	9.97
	2	47.60	35.07	38.02	24.96	9.58	10.11
	3	47.30	32.49	37.77	23.11	9.53	9.38
15%-6d	1	49.47	34.17	39.69	24.19	9.78	9.98
	2	49.64	33.44	39.87	23.72	9.77	9.72
	3	49.04	33.49	39.44	23.77	9.60	9.72
15%-12d	1	49.18	34.54	39.49	24.56	9.69	9.98
	2	50.27	34.29	40.43	24.48	9.84	9.81
	3	49.41	33.84	39.66	24.13	9.75	9.71

ตารางที่ ๖.๖

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ของแข็งรวม (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งระเหย (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งคงตัว (กรัมต่อลิตร)	
		วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30
5%-70C	1	51.46	33.80	41.33	24.13	10.13	9.67
	2	51.97	33.72	41.75	24.11	10.22	9.61
	3	51.54	32.97	41.43	23.54	10.11	9.43
5%-80C	1	49.32	34.57	39.34	24.60	9.98	9.97
	2	48.24	30.07	38.49	20.30	9.75	9.77
	3	48.11	35.25	38.36	25.10	9.75	10.15
5%-90C	1	48.44	33.53	38.90	24.06	9.54	9.47
	2	47.63	33.91	38.29	24.35	9.34	9.56
	3	49.31	33.78	39.63	23.93	9.68	9.85
10%-70C	1	47.26	34.94	37.76	24.67	9.50	10.27
	2	48.90	34.63	39.05	24.46	9.85	10.17
	3	49.54	34.48	39.56	24.35	9.98	10.13
10%-80C	1	49.78	34.35	39.42	24.24	10.36	10.11
	2	49.05	34.40	38.88	24.28	10.17	10.12
	3	50.60	35.37	40.06	24.91	10.54	10.46

ตารางที่ ๖.๖

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งรวม ของแข็งระเหย และของแข็งคงตัว (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ของแข็งรวม (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งระเหย (กรัมต่อลิตร)		ของแข็งคงตัว (กรัมต่อลิตร)	
		วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30	วันที่ 0	วันที่ 30
10%-90C	1	51.98	36.28	41.69	26.18	10.29	10.10
	2	53.66	34.72	43.12	25.07	10.54	9.65
	3	52.90	35.62	42.49	25.63	10.41	9.99
15%-70C	1	54.02	36.99	43.09	26.47	10.93	10.52
	2	53.18	35.73	42.56	25.63	10.62	10.10
	3	50.87	36.77	40.73	26.29	10.14	10.48
15%-80C	1	49.11	35.09	39.88	25.80	9.23	9.29
	2	49.59	35.17	40.23	25.80	9.36	9.37
	3	52.87	33.68	42.91	24.73	9.96	8.95
15%-90C	1	52.41	34.30	42.05	24.64	10.36	9.66
	2	52.61	36.08	42.24	25.99	10.37	10.09
	3	50.58	34.47	40.60	24.72	9.98	9.75



ตารางที่ ๑.1

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 1)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์ซ้ำ	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่					
Control	1	0	60	42	15	12	10	10	17	12	12	18	17	16	20	34	35	25	24	26	14
	2	0	60	40	12	14	4	12	12	12	16	24	18	18	21	30	33	26	17	24	14
	3	0	175	85	26	32	18	24	17	28	99	243	100	135	76	90	100	74	37	70	50
Untreated	1	0	181	77	26	32	18	22	17	26	83	214	89	113	69	78	80	60	40	60	46
	2	0	177	85	28	32	18	24	18	30	120	236	88	113	77	84	82	63	35	50	40
	3	0	75	237	222	286	180	126	50	78	223	136	49	86	54	58	53	37	24	48	32
10%-3d	1	0	77	131	160	248	166	196	93	91	69	77	68	223	114	96	71	46	27	-	-
	2	0	76	245	260	344	170	116	59	60	52	136	61	88	66	60	48	28	20	28	20
	3	0	76	304	291	298	120	70	34	122	194	113	40	63	52	60	45	0	18	29	24
15%-80C	1	0	70	299	242	350	199	104	56	98	70	89	40	90	57	6	60	38	21	31	22
	2	0	79	282	292	376	196	104	43	50	46	75	51	113	76	74	57	40	23	31	20
	3	0	79	282	292	376	196	104	43	50	46	75	51	113	76	74	57	40	23	31	20

ตารางที่ ๒.2

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 2)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์ซ้ำ	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																				
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
Control	1	0	87	58	19	23	15	19	9	4.4	5.1	6.1	8.0	10.1	12.1	14.2	16.0	19.1	22.1	24.0	27.1	30.0
	2	0	83	54	28	21	13	17	10	4.4	5.1	7	34	33	23	21	16	45	29	14	20	23
	3	0	88	51	19	21	14	15	11	4.4	5.1	5	38	30	24	21	17	27	27	12	25	22
5%-3d	1	0	111	284	235	290	140	169	113	4.4	5.1	93	130	79	60	58	51	82	69	33	41	32
	2	0	121	274	212	304	244	240	101	4.4	5.1	90	99	76	63	61	48	69	63	31	39	30
	3	0	108	318	311	298	120	164	107	4.4	5.1	117	118	82	63	60	48	53	55	28	38	27
5%-12d	1	0	97	285	325	314	142	222	139	4.4	5.1	67	118	92	77	63	48	63	56	29	39	29
	2	0	95	326	418	279	89	79	137	4.4	5.1	72	112	94	77	63	50	71	59	27	38	26
	3	0	95	356	442	269	84	138	118	4.4	5.1	70	120	89	70	58	45	63	55	30	38	27
10%-6d	1	0	105	284	230	250	229	263	108	4.4	5.1	58	95	78	72	76	58	74	62	31	39	27
	2	0	96	260	249	309	213	233	107	4.4	5.1	67	106	78	76	73	54	66	57	29	40	28
	3	0	94	272	217	283	194	230	118	4.4	5.1	70	111	82	72	76	60	74	60	34	38	28
10%-12d	1	0	98	327	116	246	326	245	101	4.4	5.1	62	93	77	70	80	63	74	61	34	38	27
	2	0	94	331	109	250	254	170	111	4.4	5.1	83	101	75	66	72	69	82	67	34	41	28
	3	0	95	290	268	310	162	207	114	4.4	5.1	65	98	84	70	66	52	71	58	30	39	27

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 3)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์ซ้ำ	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
		วันที่ 0.0	วันที่ 0.9	วันที่ 1.9	วันที่ 2.4	วันที่ 2.9	วันที่ 3.4	วันที่ 3.9	วันที่ 4.9	วันที่ 5.9	วันที่ 6.9	วันที่ 7.9	วันที่ 9.9	วันที่ 11.9	วันที่ 13.9	วันที่ 15.9	วันที่ 18.9	วันที่ 21.9	วันที่ 23.9	วันที่ 27.1	วันที่ 29.9
Control	1	0	79	47	22	17	10	11	20	18	16	14	26	25	15	20	22	19	14	14	10
	2	0	54	40	6	17	12	10	22	15	16	13	25	24	10	15	19	19	13	14	11
	3	0	65	42	19	17	10	12	19	15	16	13	23	21	16	20	21	19	11	13	11
15%-3d	1	0	92	395	378	266	95	65	63	57	113	131	117	69	43	42	50	37	26	31	23
	2	0	98	373	352	271	105	66	61	60	153	106	104	71	47	42	46	37	24	33	23
	3	0	96	325	353	299	107	73	67	59	132	38	105	66	45	39	49	36	24	30	23
15%-6d	1	0	91	386	301	261	103	75	66	103	188	116	110	66	47	44	46	41	25	31	21
	2	0	87	390	371	297	119	70	62	67	153	104	93	67	45	42	44	37	25	30	19
	3	0	88	410	315	283	103	65	60	83	183	97	93	67	53	45	48	39	21	28	20
15%-12d	1	0	83	127	281	400	244	173	141	80	70	92	90	65	48	43	47	37	24	30	17
	2	0	89	177	244	295	198	170	164	99	110	127	113	71	49	42	43	35	21	30	19
	3	0	85	163	282	368	203	139	133	120	84	62	83	69	60	57	60	41	28	30	21
5%-70C	1	0	79	260	352	303	113	69	65	119	145	93	90	62	45	40	44	38	22	30	21
	2	0	82	415	420	231	85	60	62	68	143	93	89	65	46	35	47	35	24	30	21
	3	0	84	317	363	283	115	67	65	77	160	92	87	65	52	35	45	36	23	27	19



ตารางที่ ๓.4

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 4)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
		วันที่ 0.0	วันที่ 0.9	วันที่ 1.9	วันที่ 2.4	วันที่ 2.9	วันที่ 3.4	วันที่ 3.9	วันที่ 4.9	วันที่ 6.0	วันที่ 7.0	วันที่ 7.9	วันที่ 10.0	วันที่ 12.0	วันที่ 14.0	วันที่ 15.9	วันที่ 18.9	วันที่ 21.9	วันที่ 23.9	วันที่ 26.9	วันที่ 29.9
Control	1	0	63	39	23	19	15	13	22	20	16	11	25	23	17	16	16	13	11	12	13
	2	0	25	40	22	17	13	13	21	19	16	15	24	22	18	17	13	12	9	10	12
	3	0	54	41	20	18	14	13	21	20	15	15	24	22	17	18	18	14	14	11	12
5%-80C	1	0	75	439	327	179	72	139	177	104	73	54	87	65	58	64	47	35	20	27	24
	2	0	74	436	396	203	65	120	165	112	66	61	91	63	55	63	49	30	19	23	21
	3	0	73	404	307	202	73	137	178	102	65	46	69	64	76	78	61	37	23	28	24
5%-90C	1	0	72	388	187	232	110	174	226	120	80	61	86	74	66	45	41	34	24	25	23
	2	0	70	405	164	207	110	181	230	123	70	48	70	64	74	75	61	39	27	29	26
	3	0	72	452	203	199	89	154	228	120	82	55	65	53	55	67	59	43	24	29	30
10%-70C	1	0	89	481	257	170	68	134	179	98	65	46	66	68	86	61	49	38	22	26	22
	2	0	86	520	234	155	81	153	157	94	70	46	68	59	72	78	59	33	25	29	24
	3	0	89	546	256	141	58	125	173	103	67	44	65	65	73	75	58	35	22	27	24
10%-80C	1	0	76	440	246	194	76	127	182	104	70	47	74	76	74	70	53	35	22	23	23
	2	0	77	507	242	154	69	147	160	95	60	47	75	75	70	65	53	37	23	25	25
	3	0	78	493	233	170	65	145	170	95	73	49	71	72	71	67	55	33	24	24	25

ตารางที่ ๕.5

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 5)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์ซ้ำ	ปริมาณก๊าซมีเทนรายวัน (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่					
Control	1	0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	5.0	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	19.0	21.0	23.9	27.0	29.9
	2	0	74	57	24	18	15	6	18	18	14	13	25	20	23	17	13	18	11	14	13
	3	0	72	57	23	20	15	6	20	18	14	13	25	19	20	15	13	16	11	14	14
5%-6d	1	0	70	50	20	16	11	15	17	16	15	13	23	20	19	14	16	16	15	14	14
	2	0	82	351	335	262	83	69	351	168	74	53	65	68	33	26	26	30	27	25	21
	3	0	84	345	322	282	91	69	211	179	94	60	81	71	57	43	28	33	31	25	20
10%-90C	1	0	82	292	338	271	104	64	267	210	81	56	72	43	38	29	29	22	25	26	22
	2	0	84	482	377	195	65	49	86	154	98	58	83	67	53	41	28	32	30	24	21
	3	0	86	409	395	234	63	63	248	143	80	51	75	68	59	44	31	42	30	25	21
15%-70C	1	0	84	309	406	290	80	51	57	43	110	284	99	45	39	33	32	46	38	31	26
	2	0	84	459	407	184	70	47	100	184	105	62	79	59	50	38	34	38	31	23	26
	3	0	82	389	430	209	71	60	194	141	79	53	80	58	48	33	27	34	26	20	18
15%-90C	1	0	88	383	411	228	76	64	200	135	83	53	75	62	49	33	29	35	28	25	28
	2	0	83	530	418	187	64	50	100	150	104	67	79	59	53	37	29	30	30	27	20
	3	0	77	470	335	198	66	80	240	146	104	66	80	64	50	36	31	33	42	32	21
3	0	84	526	389	206	76	55	131	166	86	67	75	66	49	35	26	27	28	24	20	

ภาคผนวก ก  
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองแต่ละชุด  
ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



ตารางที่ ๑.1

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เซตที่ 1)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่					
Control	1	0	60	102	117	129	139	149	166	178	190	208	225	241	261	295	330	355	379	405	419
	2	0	60	100	112	126	130	142	154	166	182	206	224	242	263	293	326	352	369	393	407
Untreated	1	0	175	260	286	318	336	360	377	405	504	747	847	982	1,058	1,148	1,248	1,322	1,359	1,429	1,479
	2	0	181	258	284	316	334	356	373	399	482	696	785	898	967	1,045	1,125	1,185	1,225	1,285	1,331
	3	0	177	262	290	322	340	364	382	412	532	768	856	969	1,046	1,130	1,212	1,275	1,310	1,360	1,400
10%-3d	1	0	75	312	534	820	1,000	1,126	1,176	1,254	1,477	1,613	1,662	1,748	1,802	1,860	1,913	1,950	1,974	2,022	2,054
	2	0	77	208	368	616	782	978	1,071	1,162	1,231	1,308	1,376	1,599	1,713	1,809	1,880	1,926	1,953	-	-
	3	0	76	321	581	925	1,095	1,211	1,270	1,330	1,382	1,518	1,579	1,667	1,733	1,793	1,841	1,869	1,889	1,917	1,937
15%-80C	1	0	76	380	671	969	1,089	1,159	1,193	1,315	1,509	1,622	1,662	1,725	1,777	1,837	1,882	1,882	1,900	1,929	1,953
	2	0	70	369	611	961	1,160	1,264	1,320	1,418	1,488	1,577	1,617	1,707	1,764	1,770	1,830	1,868	1,889	1,920	1,942
	3	0	79	361	653	1,029	1,225	1,329	1,372	1,422	1,468	1,543	1,594	1,707	1,783	1,857	1,914	1,954	1,977	2,008	2,028

ตารางที่ ๒.2

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่ย้อนถ่วงมี 3.5 องศาเซลเซียส (เขตที่ 2)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่		
Control	1	0	87	145	164	187	202	221	230	248	252	283	317	340	363	379	422	456	469	487	509
	2	0	83	137	165	186	199	216	226	243	250	284	317	340	361	377	422	451	465	485	508
	3	0	88	139	158	179	193	208	219	236	241	279	309	333	354	371	398	425	437	462	484
5%-3d	1	0	111	395	630	920	1,060	1,229	1,342	1,497	1,590	1,720	1,799	1,859	1,917	1,968	2,050	2,119	2,152	2,193	2,225
	2	0	121	395	607	911	1,155	1,395	1,496	1,586	1,639	1,738	1,814	1,877	1,938	1,986	2,055	2,118	2,149	2,188	2,218
	3	0	108	426	737	1,035	1,155	1,319	1,426	1,543	1,611	1,729	1,811	1,874	1,934	1,982	2,035	2,090	2,118	2,156	2,183
5%-12d	1	0	97	382	707	1,021	1,163	1,385	1,524	1,640	1,707	1,825	1,917	1,994	2,057	2,105	2,168	2,224	2,253	2,292	2,321
	2	0	95	421	839	1,118	1,207	1,286	1,423	1,582	1,654	1,766	1,860	1,937	2,000	2,050	2,121	2,180	2,207	2,245	2,271
	3	0	95	451	893	1,162	1,246	1,384	1,502	1,626	1,696	1,816	1,905	1,975	2,033	2,078	2,141	2,196	2,226	2,264	2,291
10%-6d	1	0	105	389	619	869	1,098	1,361	1,469	1,583	1,641	1,736	1,814	1,886	1,962	2,020	2,094	2,156	2,187	2,226	2,253
	2	0	96	356	605	914	1,127	1,360	1,467	1,570	1,637	1,743	1,821	1,897	1,970	2,024	2,090	2,147	2,176	2,216	2,244
	3	0	94	366	583	866	1,060	1,290	1,408	1,520	1,590	1,701	1,783	1,855	1,931	1,991	2,065	2,125	2,159	2,197	2,225
10%-12d	1	0	98	425	541	787	1,113	1,358	1,459	1,576	1,638	1,731	1,808	1,878	1,958	2,021	2,095	2,156	2,190	2,228	2,255
	2	0	94	425	534	784	1,038	1,208	1,319	1,486	1,569	1,670	1,745	1,811	1,883	1,952	2,034	2,101	2,135	2,176	2,204
	3	0	95	385	653	963	1,125	1,332	1,446	1,574	1,639	1,737	1,821	1,891	1,957	2,009	2,080	2,138	2,168	2,207	2,234

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 3)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
Control	1	0	79	126	148	165	175	186	206	224	240	254	280	305	320	340	362	381	395	409	419
	2	0	54	94	100	117	129	139	161	176	192	205	230	254	264	279	298	317	330	344	355
	3	0	65	107	126	143	153	165	184	199	215	228	251	272	288	308	329	348	359	372	383
15%-3d	1	0	92	487	865	1,131	1,226	1,291	1,354	1,411	1,524	1,655	1,772	1,841	1,884	1,926	1,976	2,013	2,039	2,070	2,093
	2	0	98	471	823	1,094	1,199	1,265	1,326	1,386	1,539	1,645	1,749	1,820	1,867	1,909	1,955	1,992	2,016	2,049	2,072
	3	0	96	421	774	1,073	1,180	1,253	1,320	1,379	1,511	1,549	1,654	1,720	1,765	1,804	1,853	1,889	1,913	1,943	1,966
15%-6d	1	0	91	477	778	1,039	1,142	1,217	1,283	1,386	1,574	1,690	1,800	1,866	1,913	1,957	2,003	2,044	2,069	2,100	2,121
	2	0	87	477	848	1,145	1,264	1,334	1,396	1,463	1,616	1,720	1,813	1,880	1,925	1,967	2,011	2,048	2,073	2,103	2,122
	3	0	88	498	813	1,096	1,199	1,264	1,324	1,407	1,590	1,687	1,780	1,847	1,900	1,945	1,993	2,032	2,053	2,081	2,101
15%-12d	1	0	83	210	491	891	1,135	1,308	1,449	1,529	1,599	1,691	1,781	1,846	1,894	1,937	1,984	2,021	2,045	2,075	2,092
	2	0	89	266	510	805	1,003	1,173	1,337	1,436	1,546	1,673	1,786	1,857	1,906	1,948	1,991	2,026	2,047	2,077	2,096
	3	0	85	248	530	898	1,101	1,240	1,373	1,493	1,577	1,639	1,722	1,791	1,851	1,908	1,968	2,009	2,037	2,067	2,088
5%-70C	1	0	79	339	691	994	1,107	1,176	1,241	1,360	1,505	1,598	1,688	1,750	1,795	1,835	1,879	1,917	1,939	1,969	1,990
	2	0	82	497	917	1,148	1,233	1,293	1,355	1,423	1,566	1,659	1,748	1,813	1,859	1,894	1,941	1,976	2,000	2,030	2,051
	3	0	84	401	764	1,047	1,162	1,229	1,294	1,371	1,531	1,623	1,710	1,775	1,827	1,862	1,907	1,943	1,966	1,993	2,012

ตารางที่ ๓.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 4)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																		
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่					
Control	0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.9	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	18.9	21.9	23.9	26.9	29.9
1	0	63	102	125	144	159	172	194	214	230	241	266	289	306	322	338	351	362	374	387
2	0	25	65	87	104	117	130	151	170	186	201	225	247	265	282	295	307	316	326	338
3	0	54	95	115	133	147	160	181	201	216	231	255	277	294	312	330	344	358	369	381
5%-80C	0	75	514	841	1,020	1,092	1,231	1,408	1,512	1,585	1,639	1,726	1,791	1,849	1,913	1,960	1,995	2,015	2,042	2,066
2	0	74	510	906	1,109	1,174	1,294	1,459	1,571	1,637	1,698	1,789	1,852	1,907	1,970	2,019	2,049	2,068	2,091	2,112
3	0	73	477	784	986	1,059	1,196	1,374	1,476	1,541	1,587	1,656	1,720	1,796	1,874	1,935	1,972	1,995	2,023	2,047
5%-90C	0	72	460	647	879	989	1,163	1,389	1,509	1,589	1,650	1,736	1,810	1,876	1,921	1,962	1,996	2,020	2,045	2,068
2	0	70	475	639	846	956	1,137	1,367	1,490	1,560	1,608	1,678	1,742	1,816	1,891	1,952	1,991	2,018	2,047	2,073
3	0	72	524	727	926	1,015	1,169	1,397	1,517	1,599	1,654	1,719	1,772	1,827	1,894	1,953	1,996	2,020	2,049	2,079
10%-70C	0	89	570	827	997	1,065	1,199	1,378	1,476	1,541	1,587	1,653	1,721	1,807	1,868	1,917	1,955	1,977	2,003	2,025
2	0	86	606	840	995	1,076	1,229	1,386	1,480	1,550	1,596	1,664	1,723	1,795	1,873	1,932	1,965	1,990	2,019	2,043
3	0	89	635	891	1,032	1,090	1,215	1,388	1,491	1,558	1,602	1,667	1,732	1,805	1,880	1,938	1,973	1,995	2,022	2,046
10%-80C	0	76	516	762	956	1,032	1,159	1,341	1,445	1,515	1,562	1,636	1,712	1,786	1,856	1,909	1,944	1,966	1,989	2,012
2	0	77	584	826	980	1,049	1,196	1,356	1,451	1,511	1,558	1,633	1,708	1,778	1,843	1,896	1,933	1,956	1,981	2,006
3	0	78	571	804	974	1,039	1,184	1,354	1,449	1,522	1,571	1,642	1,714	1,785	1,852	1,907	1,940	1,964	1,988	2,013

## ตารางที่ ๕.5

## ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองแต่ละชุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 5)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่
Control	วิเคราะห์ซ้ำ	0.0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.4	4.9	5.4	5.9	6.4	6.9	7.4	7.9	8.4	8.9	9.4	9.9	
		0	74	131	155	173	188	194	212	212	230	244	257	282	302	325	342	355	373	384	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		0	72	129	152	172	187	193	213	213	231	245	258	283	302	322	337	350	366	377	
		0	70	120	140	156	167	182	199	199	215	230	243	266	286	305	319	335	351	366	
5%-6d		0	82	433	768	1,030	1,113	1,182	1,533	1,701	1,775	1,828	1,893	1,961	1,994	2,020	2,046	2,076	2,103	2,128	
		0	84	429	751	1,033	1,124	1,193	1,404	1,583	1,677	1,737	1,818	1,889	1,946	1,989	2,017	2,050	2,081	2,106	
		0	82	374	712	983	1,087	1,151	1,418	1,628	1,709	1,765	1,837	1,880	1,918	1,947	1,976	1,998	2,023	2,049	
10%-90C		0	84	566	943	1,138	1,203	1,252	1,338	1,492	1,590	1,648	1,731	1,798	1,851	1,892	1,920	1,952	1,982	2,027	
		0	86	495	890	1,124	1,187	1,250	1,498	1,641	1,721	1,772	1,847	1,915	1,974	2,018	2,049	2,091	2,121	2,146	
		0	84	393	799	1,089	1,169	1,220	1,277	1,320	1,430	1,714	1,813	1,858	1,897	1,930	1,962	2,008	2,046	2,077	
15%-70C		0	84	543	950	1,134	1,204	1,251	1,351	1,535	1,640	1,702	1,781	1,840	1,890	1,928	1,962	2,000	2,031	2,054	
		0	82	471	901	1,110	1,181	1,241	1,435	1,576	1,655	1,708	1,788	1,846	1,894	1,927	1,954	1,988	2,014	2,034	
		0	88	471	882	1,110	1,186	1,250	1,450	1,585	1,668	1,721	1,796	1,858	1,907	1,940	1,969	2,004	2,032	2,057	
15%-90C		0	83	613	1,031	1,218	1,282	1,332	1,432	1,582	1,686	1,753	1,832	1,891	1,944	1,981	2,010	2,040	2,070	2,097	
		0	77	547	882	1,080	1,146	1,226	1,466	1,612	1,716	1,782	1,862	1,926	1,976	2,012	2,043	2,076	2,118	2,150	
		0	84	610	999	1,205	1,281	1,336	1,467	1,633	1,719	1,786	1,861	1,927	1,976	2,011	2,037	2,064	2,092	2,116	



ภาคผนวก ร  
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น  
ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



ตารางที่ ฐ.1

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 1)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																		
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่			
Untreated	0.0	1.0	2.0	2.4	3.0	3.4	4.0	4.4	5.1	6.1	8.0	9.1	11.1	13.1	16.0	19.1	22.1	24.0	27.3	30.0
	0	115	102	117	129	139	149	166	178	190	208	225	241	261	295	330	355	379	405	419
	0	121	100	112	126	130	142	154	166	182	206	224	242	263	293	326	352	369	393	407
	0	117	159	172	191	202	215	217	233	318	540	623	741	796	854	920	969	985	1,030	1,066
10%-3d	1	0	15	157	170	189	200	211	213	227	296	489	561	657	705	797	832	851	886	918
	0	17	161	176	195	206	219	222	240	346	561	632	728	784	836	884	922	936	961	987
	0	16	211	420	693	866	981	1,016	1,082	1,291	1,406	1,438	1,507	1,540	1,566	1,585	1,597	1,600	1,623	1,641
15%-80C	1	0	16	107	254	489	648	833	911	990	1,045	1,101	1,152	1,358	1,451	1,515	1,552	1,573	1,579	-
	0	10	220	467	798	961	1,066	1,110	1,158	1,196	1,311	1,355	1,426	1,471	1,499	1,513	1,516	1,515	1,518	1,524
	0	19	279	557	842	955	1,014	1,033	1,143	1,323	1,415	1,438	1,484	1,515	1,543	1,554	1,529	1,526	1,530	1,540

ตารางที่ ๒.๒

ข้อมูลผลถดถอยการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 2)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
5%-3d	1	0	25	255	468	736	862	1,014	1,117	1,255	1,342	1,438	1,485	1,521	1,558	1,592	1,636	1,675	1,695	1,715	1,725
	2	0	35	255	445	727	957	1,180	1,271	1,344	1,391	1,456	1,500	1,539	1,579	1,610	1,641	1,674	1,692	1,710	1,718
	3	0	22	286	575	851	957	1,104	1,201	1,301	1,363	1,447	1,497	1,536	1,575	1,606	1,621	1,646	1,661	1,678	1,683
5%-12d	1	0	11	242	545	837	965	1,170	1,299	1,398	1,459	1,543	1,603	1,656	1,698	1,729	1,754	1,780	1,796	1,814	1,821
	2	0	9	281	677	934	1,009	1,071	1,198	1,340	1,406	1,484	1,546	1,599	1,641	1,674	1,707	1,736	1,750	1,767	1,771
	3	0	9	311	731	978	1,048	1,169	1,277	1,384	1,448	1,534	1,591	1,637	1,674	1,702	1,727	1,752	1,769	1,786	1,791
10%-6d	1	0	19	249	457	685	900	1,146	1,244	1,341	1,393	1,454	1,500	1,548	1,603	1,644	1,680	1,712	1,730	1,748	1,753
	2	0	10	216	443	730	929	1,145	1,242	1,328	1,389	1,461	1,507	1,559	1,611	1,648	1,676	1,703	1,719	1,738	1,744
	3	0	8	226	421	682	862	1,075	1,183	1,278	1,342	1,419	1,469	1,517	1,572	1,615	1,651	1,681	1,702	1,719	1,725
10%-12d	1	0	12	285	379	603	915	1,143	1,234	1,334	1,390	1,449	1,494	1,540	1,599	1,645	1,681	1,712	1,733	1,750	1,755
	2	0	8	285	372	600	840	993	1,094	1,244	1,321	1,388	1,431	1,473	1,524	1,576	1,620	1,657	1,678	1,698	1,704
	3	0	9	245	491	779	927	1,117	1,221	1,332	1,391	1,455	1,507	1,553	1,598	1,633	1,666	1,694	1,711	1,729	1,734

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 3)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่						
15%-3d	1	0	26	378	740	989	1,074	1,128	1,170	1,211	1,308	1,426	1,518	1,564	1,593	1,617	1,646	1,664	1,678	1,695	1,707
	2	0	32	362	698	952	1,047	1,102	1,142	1,186	1,323	1,416	1,495	1,543	1,576	1,600	1,625	1,643	1,655	1,674	1,686
	3	0	30	312	649	931	1,028	1,090	1,136	1,179	1,295	1,320	1,400	1,443	1,474	1,495	1,523	1,540	1,552	1,568	1,580
15%-6d	1	0	25	368	653	897	990	1,054	1,099	1,186	1,358	1,461	1,546	1,589	1,622	1,648	1,673	1,695	1,708	1,725	1,735
	2	0	21	368	723	1,003	1,112	1,171	1,212	1,263	1,400	1,491	1,559	1,603	1,634	1,658	1,681	1,699	1,712	1,728	1,736
	3	0	22	389	688	954	1,047	1,101	1,140	1,207	1,374	1,458	1,526	1,570	1,609	1,636	1,663	1,683	1,692	1,706	1,715
15%-12d	1	0	17	101	366	749	983	1,145	1,265	1,329	1,383	1,462	1,527	1,569	1,603	1,628	1,654	1,672	1,684	1,700	1,706
	2	0	23	157	385	663	851	1,010	1,153	1,236	1,330	1,444	1,532	1,580	1,615	1,639	1,661	1,677	1,686	1,702	1,710
	3	0	19	139	405	756	949	1,077	1,189	1,293	1,361	1,410	1,468	1,514	1,560	1,599	1,638	1,660	1,676	1,692	1,702
5%-70C	1	0	13	230	566	852	955	1,013	1,057	1,160	1,289	1,369	1,434	1,473	1,504	1,526	1,549	1,568	1,578	1,594	1,604
	2	0	16	388	792	1,006	1,081	1,130	1,171	1,223	1,350	1,430	1,494	1,536	1,568	1,585	1,611	1,627	1,639	1,655	1,665
	3	0	18	292	639	905	1,010	1,066	1,110	1,171	1,315	1,394	1,456	1,498	1,536	1,553	1,577	1,594	1,605	1,618	1,626

ตารางที่ ๓.4

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 4)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่
5%-80C	1	0	28	427	732	893	951	1,077	1,233	1,317	1,374	1,415	1,477	1,520	1,561	1,608	1,639	1,661	1,670	1,686	1,697
	2	0	27	423	797	982	1,033	1,140	1,284	1,376	1,426	1,474	1,540	1,581	1,619	1,665	1,698	1,715	1,723	1,735	1,743
	3	0	26	390	675	859	918	1,042	1,199	1,281	1,330	1,363	1,407	1,449	1,508	1,569	1,614	1,638	1,650	1,667	1,678
5%-90C	1	0	25	373	538	752	848	1,009	1,214	1,314	1,378	1,426	1,487	1,539	1,588	1,616	1,641	1,662	1,675	1,689	1,699
	2	0	23	388	530	719	815	983	1,192	1,295	1,349	1,384	1,429	1,471	1,528	1,586	1,631	1,657	1,673	1,691	1,704
	3	0	25	437	618	799	874	1,015	1,222	1,322	1,388	1,430	1,470	1,501	1,539	1,589	1,632	1,662	1,675	1,693	1,710
10%-70C	1	0	42	483	718	870	924	1,045	1,203	1,281	1,330	1,363	1,404	1,450	1,519	1,563	1,596	1,621	1,632	1,647	1,656
	2	0	39	519	731	868	935	1,075	1,211	1,285	1,339	1,372	1,415	1,452	1,507	1,568	1,611	1,631	1,645	1,663	1,674
	3	0	42	548	782	905	949	1,061	1,213	1,296	1,347	1,378	1,418	1,461	1,517	1,575	1,617	1,639	1,650	1,666	1,677
10%-80C	1	0	29	429	653	829	891	1,005	1,166	1,250	1,304	1,338	1,387	1,441	1,498	1,551	1,588	1,610	1,621	1,633	1,643
	2	0	30	497	717	853	908	1,042	1,181	1,256	1,300	1,334	1,384	1,437	1,490	1,538	1,575	1,599	1,611	1,625	1,637
	3	0	31	484	695	847	898	1,030	1,179	1,254	1,311	1,347	1,393	1,443	1,497	1,547	1,586	1,606	1,619	1,632	1,644

ตารางที่ ๕.5

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (เขตที่ 5)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตร)																				
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่		
5%-6d	1	0	0	10	306	619	863	932	992	1,325	1,476	1,535	1,575	1,616	1,664	1,677	1,687	1,699	1,713	1,727	1,738	1,746
	2	0	0	12	302	602	866	943	1,003	1,196	1,358	1,437	1,484	1,541	1,592	1,629	1,656	1,670	1,687	1,705	1,716	1,723
	3	0	0	10	247	563	816	906	961	1,210	1,403	1,469	1,512	1,560	1,583	1,601	1,614	1,629	1,635	1,647	1,659	1,668
10%-90C	1	0	0	12	439	794	971	1,022	1,062	1,130	1,267	1,350	1,395	1,454	1,501	1,534	1,559	1,573	1,589	1,606	1,616	1,624
	2	0	0	14	368	741	957	1,006	1,060	1,290	1,416	1,481	1,519	1,570	1,618	1,657	1,685	1,702	1,728	1,745	1,756	1,764
	3	0	0	12	266	650	922	988	1,030	1,069	1,095	1,190	1,461	1,536	1,561	1,580	1,597	1,615	1,645	1,670	1,687	1,700
15%-70C	1	0	0	12	416	801	967	1,023	1,061	1,143	1,310	1,400	1,449	1,504	1,543	1,573	1,595	1,615	1,637	1,655	1,664	1,677
	2	0	0	10	344	752	943	1,000	1,051	1,227	1,351	1,415	1,455	1,511	1,549	1,577	1,594	1,607	1,625	1,638	1,644	1,649
	3	0	0	16	344	733	943	1,005	1,060	1,242	1,360	1,428	1,468	1,519	1,561	1,590	1,607	1,622	1,641	1,656	1,667	1,682
15%-90C	1	0	0	11	486	882	1,051	1,101	1,142	1,224	1,357	1,446	1,500	1,555	1,594	1,627	1,648	1,663	1,677	1,694	1,707	1,714
	2	0	0	5	420	733	913	965	1,036	1,258	1,387	1,476	1,529	1,585	1,629	1,659	1,679	1,696	1,713	1,742	1,760	1,768
	3	0	0	12	483	850	1,038	1,100	1,146	1,259	1,408	1,479	1,533	1,584	1,630	1,659	1,678	1,690	1,701	1,716	1,726	1,733

ภาคผนวก ๗  
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น  
ที่สภาวะมาตรฐาน



ตารางที่ ๗.1

ข้อมูลผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ภาวะมาตรฐาน (เซตที่ 1)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	
		0.0	1.0	2.0	2.4	3.0	3.4	4.0	4.4	5.1	6.1	8.0	9.1	11.1	13.1	16.0	19.1	22.1	24.0	27.3	30.0
Untreated	1	0	103	142	153	170	180	192	194	208	284	482	556	661	711	763	822	865	880	920	952
	2	0	108	140	151	168	178	188	190	203	264	437	501	586	630	671	712	743	760	791	820
	3	0	104	144	157	174	184	195	198	214	309	501	564	650	700	747	790	823	836	858	882
10%-3d	1	0	15	188	375	619	773	876	907	966	1,153	1,256	1,284	1,346	1,375	1,399	1,416	1,426	1,429	1,450	1,466
	2	0	14	96	226	436	578	744	814	884	933	983	1,028	1,212	1,296	1,353	1,386	1,404	1,410	-	-
	3	0	11	196	417	712	858	952	991	1,034	1,068	1,171	1,210	1,273	1,314	1,339	1,351	1,354	1,353	1,356	1,361
15%-80C	1	0	13	249	497	752	853	905	923	1,021	1,182	1,264	1,284	1,325	1,353	1,378	1,388	1,365	1,363	1,367	1,375
	2	0	15	239	443	744	916	999	1,036	1,113	1,163	1,224	1,244	1,309	1,342	1,318	1,342	1,353	1,353	1,358	1,366
	3	0	14	232	481	805	974	1,057	1,083	1,116	1,145	1,193	1,223	1,309	1,358	1,396	1,417	1,429	1,432	1,437	1,442



ตารางที่ ๓.2

ข้อมูลผลถดถอยการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 2)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
5%-3d	1	0	22	227	418	657	770	906	998	1,121	1,199	1,284	1,326	1,359	1,391	1,422	1,461	1,496	1,514	1,532	1,540
	2	0	31	227	397	649	855	1,054	1,135	1,200	1,243	1,300	1,339	1,375	1,410	1,438	1,466	1,495	1,511	1,527	1,534
	3	0	20	255	513	760	855	986	1,073	1,162	1,218	1,292	1,337	1,372	1,406	1,435	1,448	1,470	1,484	1,499	1,503
5%-12d	1	0	10	216	486	748	862	1,045	1,160	1,248	1,303	1,378	1,431	1,479	1,516	1,545	1,567	1,590	1,604	1,620	1,626
	2	0	8	251	604	834	901	957	1,070	1,197	1,256	1,325	1,381	1,428	1,465	1,495	1,525	1,551	1,563	1,578	1,581
	3	0	8	277	653	874	936	1,044	1,141	1,236	1,294	1,370	1,421	1,462	1,495	1,520	1,542	1,565	1,580	1,595	1,599
10%-6d	1	0	17	222	408	612	804	1,024	1,111	1,197	1,244	1,299	1,339	1,383	1,431	1,469	1,500	1,529	1,545	1,561	1,565
	2	0	9	193	395	652	830	1,023	1,109	1,186	1,241	1,305	1,346	1,393	1,439	1,472	1,497	1,521	1,535	1,552	1,557
	3	0	7	202	376	609	770	960	1,057	1,141	1,199	1,267	1,312	1,355	1,404	1,443	1,475	1,501	1,520	1,535	1,540
10%-12d	1	0	11	254	338	539	817	1,021	1,102	1,191	1,242	1,294	1,334	1,376	1,428	1,470	1,501	1,529	1,548	1,563	1,567
	2	0	7	254	332	536	750	887	977	1,111	1,180	1,240	1,278	1,316	1,361	1,408	1,447	1,480	1,499	1,517	1,522
	3	0	8	219	438	696	828	998	1,091	1,189	1,243	1,300	1,346	1,387	1,427	1,459	1,488	1,513	1,528	1,544	1,548

ตารางที่ ๓.3

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่สถานะมาตรฐาน (เขตที่ 3)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
15%-3d	1	0	23	338	661	884	959	1,007	1,045	1,082	1,169	1,274	1,356	1,397	1,423	1,444	1,470	1,487	1,498	1,514	1,525
	2	0	29	323	624	851	935	984	1,020	1,060	1,182	1,265	1,336	1,378	1,408	1,429	1,452	1,468	1,478	1,495	1,506
	3	0	27	279	580	832	918	973	1,015	1,053	1,157	1,179	1,251	1,289	1,317	1,335	1,361	1,376	1,386	1,400	1,411
15%-6d	1	0	22	329	584	801	884	941	982	1,060	1,213	1,305	1,381	1,419	1,449	1,472	1,495	1,514	1,525	1,541	1,550
	2	0	19	329	646	896	993	1,046	1,083	1,128	1,251	1,332	1,393	1,432	1,460	1,481	1,502	1,518	1,529	1,543	1,551
	3	0	20	347	615	852	935	983	1,018	1,078	1,227	1,302	1,363	1,402	1,437	1,461	1,486	1,503	1,511	1,524	1,532
15%-12d	1	0	15	90	327	669	878	1,022	1,130	1,187	1,236	1,306	1,364	1,401	1,432	1,454	1,478	1,494	1,504	1,518	1,524
	2	0	21	140	344	592	760	902	1,030	1,104	1,188	1,290	1,369	1,411	1,443	1,464	1,484	1,498	1,506	1,520	1,528
	3	0	17	124	362	676	847	962	1,062	1,155	1,216	1,259	1,311	1,352	1,394	1,428	1,463	1,483	1,497	1,511	1,520
5%-70C	1	0	12	205	506	761	853	904	944	1,036	1,152	1,223	1,281	1,316	1,344	1,363	1,384	1,401	1,409	1,424	1,433
	2	0	14	347	708	899	965	1,009	1,046	1,093	1,206	1,277	1,335	1,372	1,401	1,416	1,439	1,453	1,464	1,478	1,487
	3	0	16	261	571	809	902	952	992	1,046	1,175	1,245	1,301	1,338	1,372	1,387	1,409	1,424	1,433	1,445	1,453

ตารางที่ ๗.4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ลภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 4)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่				
5%-80C	1	0	0.9	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.9	6.0	7.0	7.9	10.0	12.0	14.0	15.9	18.9	21.9	23.9	26.9	29.9
	2	0	24	378	712	877	923	1,018	1,147	1,229	1,274	1,316	1,376	1,412	1,446	1,487	1,517	1,532	1,539	1,549	1,557
	3	0	23	348	603	767	820	931	1,071	1,144	1,188	1,217	1,257	1,294	1,347	1,401	1,442	1,463	1,473	1,489	1,499
5%-90C	1	0	22	333	481	672	757	901	1,084	1,174	1,231	1,273	1,328	1,375	1,418	1,443	1,466	1,484	1,496	1,508	1,518
	2	0	20	346	473	642	728	878	1,064	1,157	1,205	1,236	1,277	1,314	1,364	1,416	1,457	1,480	1,494	1,510	1,522
	3	0	22	390	552	714	781	907	1,091	1,181	1,240	1,277	1,313	1,341	1,374	1,419	1,458	1,484	1,496	1,512	1,528
10%-70C	1	0	37	431	641	777	825	933	1,074	1,144	1,188	1,217	1,254	1,295	1,356	1,396	1,425	1,448	1,457	1,471	1,479
	2	0	35	463	653	775	835	960	1,081	1,148	1,196	1,225	1,264	1,297	1,346	1,400	1,439	1,457	1,469	1,485	1,495
	3	0	37	489	698	808	848	948	1,083	1,158	1,203	1,230	1,267	1,305	1,355	1,406	1,444	1,464	1,473	1,488	1,498
10%-80C	1	0	26	383	583	740	796	898	1,041	1,116	1,165	1,195	1,239	1,287	1,338	1,385	1,418	1,438	1,448	1,458	1,468
	2	0	26	444	640	762	811	931	1,055	1,122	1,161	1,191	1,236	1,283	1,330	1,373	1,407	1,428	1,439	1,451	1,462
	3	0	27	432	621	756	802	920	1,053	1,120	1,171	1,203	1,244	1,289	1,337	1,381	1,417	1,434	1,446	1,457	1,469

ตารางที่ ๗.5

ข้อมูลผลจากการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้นที่ภาวะมาตรฐาน (เขตที่ 5)

ชุดการทดลอง	การวิเคราะห์	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุตั้งต้น (มิลลิลิตรมาตรฐาน)																			
		วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	วันที่	
5%-6d	1	0	9	274	553	771	833	886	1,183	1,318	1,371	1,407	1,443	1,487	1,498	1,507	1,518	1,530	1,543	1,553	1,559
	2	0	11	270	538	773	843	896	1,068	1,213	1,284	1,326	1,376	1,422	1,455	1,479	1,492	1,506	1,523	1,533	1,539
	3	0	9	221	503	729	809	859	1,081	1,253	1,312	1,351	1,393	1,414	1,430	1,442	1,455	1,460	1,471	1,482	1,489
10%-90C	1	0	11	392	709	867	913	949	1,009	1,131	1,206	1,246	1,299	1,341	1,370	1,393	1,405	1,419	1,435	1,444	1,450
	2	0	13	329	662	855	899	947	1,152	1,264	1,323	1,357	1,402	1,445	1,480	1,505	1,520	1,543	1,559	1,569	1,575
	3	0	11	238	581	823	883	920	955	978	1,063	1,305	1,372	1,395	1,411	1,427	1,443	1,469	1,492	1,507	1,518
15%-70C	1	0	11	372	715	864	914	948	1,021	1,170	1,251	1,294	1,343	1,378	1,405	1,425	1,443	1,462	1,478	1,487	1,498
	2	0	9	308	672	842	893	939	1,096	1,206	1,264	1,300	1,350	1,384	1,408	1,424	1,436	1,451	1,463	1,469	1,473
	3	0	14	308	655	842	898	947	1,109	1,214	1,276	1,311	1,357	1,395	1,420	1,436	1,449	1,465	1,479	1,489	1,502
15%-90C	1	0	10	434	788	939	984	1,020	1,093	1,212	1,292	1,340	1,389	1,424	1,453	1,472	1,486	1,498	1,513	1,525	1,531
	2	0	4	375	655	815	862	926	1,124	1,239	1,319	1,366	1,416	1,455	1,481	1,500	1,515	1,530	1,556	1,572	1,579
	3	0	11	432	759	927	983	1,024	1,124	1,257	1,321	1,369	1,415	1,456	1,481	1,499	1,510	1,519	1,533	1,542	1,548

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววิทยาภรณ์ คงอยู่
วัน เดือน ปี เกิด	18 พฤษภาคม 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดสมุทรสงคราม
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (เกียรตินิยมอันดับ 2) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2558 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	62/1 หมู่ 11 ตำบลบางขันแตก อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม 75000
ผลงานตีพิมพ์	Kongyoo, W., Sazali, M. Z. Z. B., Ratasuk, N., & Sungthong, D. (2019, 13-15 June). Optimization of Ca(OH) <sub>2</sub> pretreatment to enhance methane production of rice straw using response surface methodology. Paper presented at the the 5th EnvironmentAsia International Conference on Conference Transboundary Environmental Nexus: From Local to Regional Perspectives, Convention center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand.