



สมรรถนะทางความร้อนของเตาชนิดเผาพร้อมระหว่างชีวมวลอัดก้อนและก๊าซปิโตรเลียมเหลว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

สมรรถนะทางความร้อนของเตาชนิดเผาร่วมระหว่างชีวมวลอัดก้อนและก๊าซปิโตรเลียม
เหลว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THERMAL PERFORMANCE OF CO-COMBUSTION STOVE USING BRIQUETTE
BIOMASS AND LIQUID PETROLEUM GAS AS FUEL.



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (ENERGY ENGINEERING)
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2017
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ สมรรถนะทางความร้อนของเตาชนิดเผาพร้อมระหว่างชีวมวลอัดก้อนและก๊าซ
ปิโตรเลียมเหลว
โดย นพพล จินาไหม
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตพงษ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)
พิจารณาเห็นชอบโดย
..... ประธานกรรมการ
(ดร. ณัฐวุฒิ ธาราวดี)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตพงษ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์)
..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร. สุระ ตันดี)



56406306 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : อัตราการให้ความร้อน, กำลังความร้อน, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

นาย นพพล จินาไหม: สมรรถนะทางความร้อนของเตาชนิดเผาพร้อมระหว่างชีวมวลอัดก้อน และก๊าซปิโตรเลียมเหลว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตินงค์ โสภณพงศ์ พิพัฒน์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา อัตราการให้ความร้อน กำลังความร้อน และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาประกอบอาหารทรงกระบอกที่ใช้เชื้อเพลิงอัดและก๊าซหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิงร่วม รวมถึงการศึกษาต้นทุนเชื้อเพลิงต่อหน่วยความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ของเตา ได้มีการสร้างเตารูปทรงกระบอกเพื่อใช้ในการวิจัยสามขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตร ความสูง 400 มิลลิเมตร โดยบรรจุเชื้อเพลิง จำนวน 3.5 11.0 และ 24.0 กิโลกรัมในเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับการติดเตาแต่ละครั้งจะเป็นการเผาไหม้ร่วมกันระหว่างชีวมวลอัดและก๊าซหุงต้มที่อัตราไหลคงที่ และใช้อัตราไหลก๊าซหุงต้ม 3 ค่า คือ 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.0×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที จากการทดลองพบว่าอัตราการให้ความร้อนของเตาเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง อัตราการให้ความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจาก 1.53 องศาเซลเซียสต่อวินาที เป็น 3.07 องศาเซลเซียสต่อวินาที เมื่ออัตราไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 2.38×10^{-5} เป็น 5.0×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที เตาขนาด 385 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจาก 2.55 องศาเซลเซียสต่อวินาที เป็น 3.37 องศาเซลเซียสต่อวินาที และเตาขนาด 550 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้นจาก 2.80 เป็น 4.22 องศาเซลเซียสต่อวินาที กำลังของเตาเมื่อไม่ใช้ก๊าซหุงต้มอยู่ในช่วง 0.97-1.38 กิโลวัตต์ ที่อัตราไหลก๊าซ 5×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีอยู่ในช่วง 2.30-3.10 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพของเตาเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราไหลก๊าซจาก $0-5 \times 10^{-5}$ กิโลกรัมต่อวินาที เตาขนาด 225 มิลลิเมตรเพิ่มจาก 12.45 เป็น 21.96 เปอร์เซ็นต์ เตาขนาด 385 มิลลิเมตรเพิ่มจาก 8.19 เป็น 19.30 เปอร์เซ็นต์ และเตาขนาด 550 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้นจาก 6.15 เป็น 18.51 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตามีผลให้ได้ความร้อนที่เป็นใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้น และระยะเวลาจุดเตานานขึ้นแต่ไม่มีผลต่อกำลังและอัตราการให้ความร้อนของเตา การใช้เชื้อเพลิงร่วมชีวมวลอัดและก๊าซหุงต้มมีผลประหยัดมากกว่าการใช้ก๊าซหุงต้มเพียงอย่างเดียว ต้นทุนต่อหน่วยความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ของเตาขนาด 225 และ 385 อยู่ที่ 0.52 บาทต่อเมกะจูล ถึง 0.85 บาทต่อเมกะจูล และ 0.66 บาทต่อเมกะจูล ถึง 0.82 บาทต่อเมกะจูลตามลำดับ

56406306 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : TORREFACTION / BIOMASS / HEATING VALUE / BULK DENSITY / DURABILITY /
PELLETIZATION OF TORREFIED BIOMASS / TORREFACTION OF BIOMASS PELLET/ PELLETING

MR. Noppon GINARMAI: THERMAL PERFORMANCE OF CO-COMBUSTION
STOVE USING BRIQUETTE BIOMASS AND LIQUID PETROLEUM GAS AS FUEL. Thesis
advisor : Assistant Professor Nitipong Soponpongpiat, Ph.D.

The heating rate, stove rating, and thermal efficiency of cylindrical stove using compressed sawdust and liquid petroleum gas (LPG) as co-combustion fuels were investigated. The fuel cost per unit useful heat of this stove was also studied. Two cylindrical stoves with a height of 400 mm. and outside diameter of 225, 385 and 550 mm. were constructed. The sawdust mass of 3.5, 11 and 24 kg was compressed into the cylindrical stove with outside diameter of 225, 385 and 550 mm., respectively. Compressed sawdust of each stove was combusted together with LPG with a constant given flow rate. The LPG flow rate was set at 0, 2.38×10^{-5} , 3.33×10^{-5} and 5.00×10^{-5} kg/s. It was found that when LPG was used, the heating rate tended to linearly increase with the increase of LPG flow rate. For 225 mm. stove, the heating rate increased from 1.53 °C/min to 3.07 °C/min when the LPG flow rate was increased from 2.38×10^{-5} to 5×10^{-5} kg/s. For 385 mm. stove, the heating rate increased from 2.25 °C/min to 3.37 °C/min. Without the use of LPG, the stove rating was in range of 0.97–1.38 kW. At the LPG flow rate of 5×10^{-5} kg/s, the stove rating was in range of 2.30–3.10 kW. The stove efficiency increased when LPG flow rate was increased. When LPG flow rate was increased from 0 to 5×10^{-5} kg/s., the efficiency of 225 mm. stove increased from 12.45% to 21.96%, the efficiency of 385 mm. stove increased from 8.19% to 19.30% and the efficiency of 550 mm. stove increased from 6.15% to 18.51%. The increase of stove diameter resulted in the increase of useful heat and heat releasing time but it did not affect stove heating rate and stove rating. The co-combustion between LPG and compressed sawdust in cylindrical stove gave a lower fuel cost than only use of LPG. The fuel cost per unit useful heat of 225 mm. and 385 mm. stove was in range of 0.52 Baht/MJ to 0.85 Baht/MJ and 0.66 Baht/MJ to 0.82 Baht/MJ, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัย ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้แนวทางในการศึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ระหว่างการดำเนินการวิจัยอีกด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร

ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งความช่วยเหลือต่างๆ รวมทั้ง ผศ.ดร. สุระ ตันดี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ ซึ่งเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และข้อแก้ไขแก่วิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ

คุณศรัณย์ ทรัพย์สัมฤทธิ์กุล ที่ให้คำแนะนำในการออกแบบ และจัดสร้างอุปกรณ์เครื่องมือ ต่างๆ

ที่ใช้สำหรับงานวิจัย และ ขอขอบคุณ แพทย์หญิง ลัดดาวัลย์ นวลแจ่ม ที่ได้ให้ข้อคิดเห็น คำเสนอแนะ และช่วยตรวจทานแก้ไขต้นฉบับ

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญ ที่สละเวลาในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องของ งานวิจัย ตรวจทานความถูกต้องของภาษาในการจัดพิมพ์แก่วิทยานิพนธ์เล่มนี้

ผู้วิจัย ขออุทิศผลสำเร็จในงานวิจัยนี้ให้แก่บิดา มารดา ขอขอบคุณครอบครัว ที่ให้การ สนับสนุน รวมถึง เพื่อนนักศึกษา (ต่างวัย) สำหรับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจนจบการศึกษา ตลอดจนบุคคล ต่างๆ อีกมาก ซึ่งผู้วิจัยไม่อาจกล่าวนามได้หมด ณ ที่นี้ สำหรับ กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ ผู้วิจัย รู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณและ ขอขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

นพพล จินาไหม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	5
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.....	5
1.7 ความจำกัดของการวิจัย	6
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 สารชีวมวล.....	7
2.2 องค์ประกอบของสารชีวมวลมีดังนี้.....	7
2.3 คุณสมบัติของสารชีวมวลและการวิเคราะห์.....	9
2.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวล.....	10
2.5 การเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีและความร้อนของสารชีวมวล.....	15
2.6 สมดุลพลังงานของอุปกรณ์.....	19
2.8 ค่าดัชนีการใช้พลังงาน (Specific energy consumption, SEC)	27

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	30
3.1 แผนการวิจัย	30
3.2 แผนการทดลอง	31
3.3 วิธีการทดลอง.....	33
3.4 วัตถุประสงค์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย	35
3.5 ระยะเวลาการวิจัย	36
3.6 สถานที่ทำการวิจัย	36
3.7 งบประมาณการวิจัย.....	36
3.8 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการสรุปผลการวิจัย	37
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....	40
4.1 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) และกำลังของเตา.....	40
4.2 ประสิทธิภาพของเตา	43
4.3 ความร้อนใช้ประโยชน์.....	45
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนเชื้อเพลิง.....	47
4.5 สมดุลพลังงาน.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.1 บทสรุปผลการทดลอง	57
5.2 สรุปผลการทดลอง	57
5.3 ข้อเสนอแนะ	58
รายการอ้างอิง	59
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียน	159

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาพลังงานเป็นปัญหาใหญ่ที่มีผลกระทบรุนแรงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมโลก ซึ่งความรุนแรงนี้จะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นโดยมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกและการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว [1] ซึ่งปัญหาของพลังงานประกอบไปด้วยปัญหาเรื่องของการขาดแคลนและปัญหาปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้นเนื่องการนำไปใช้ แหล่งพลังงานสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในช่วงที่ผ่านมาได้แก่น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน โดยมีแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พืชชีวมวล

ซึ่งยังเป็นสัดส่วนการใช้ที่น้อยอยู่ เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดจากซากดึกดำบรรพ์ (Fossil) ทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี ได้ถูกนำมาใช้ในสัดส่วนมากที่สุด เป็นเชื้อเพลิงชนิดที่ใช้แล้วหมดไป ซึ่งจะนำไปสู่ปัญหาการขาดแคลนพลังงานได้ในอนาคต และที่สำคัญการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานนี้จำเป็นต้องใช้กระบวนการเผาไหม้ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก (GHGs) ปล่อยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน (Global warming) อุณหภูมิของโลกจะสูงขึ้นสภาพภูมิอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากปกติทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ร้ายแรง เช่น ภาวะแห้งแล้งผิดปกติ หรือ ภาวะน้ำท่วมใหญ่อันเกิดจากฝนตกหนัก เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นในการค้นคว้าวิจัยหาทางเลือกใหม่เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นโดยการพัฒนาแหล่งพลังงานที่เป็นพลังงานสะอาด และมีความยั่งยืน

แหล่งพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่ แหล่งที่เกิดจากการเก็บสะสม เช่น ฟอสซิล ป่าไม้ และแหล่งกำเนิดหมุนเวียน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานสารชีวมวล เป็นต้น โดยแหล่งกำเนิดหมุนเวียนเป็นแหล่งที่ใช้ไม่มีวันหมดหรือสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้เป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่วนเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นมีการรณรงค์ให้ลดการใช้ลงโดยผ่านทางมาตรการต่างๆ เช่น การจัดทำข้อตกลงระหว่างประเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น สนธิสัญญาเกียวโต (Kyoto protocol) การซื้อ-ขายคาร์บอน (Carbon credit) การกำหนดให้ติดเครื่องหมายแสดงถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint of Product: CFP) บนสินค้า ซึ่งข้อตกลงเหล่านี้จะเอื้อต่อการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนโดยเฉพาะเชื้อเพลิงจากชีวมวล

ชีวมวล คือมวลสารของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจเป็นป่าไม้ และกากเหลือของทางการเกษตรเช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว หรือของเสียอินทรีย์จากโรงงานอุตสาหกรรม เกษตร ฯลฯ รวมทั้งมูลสัตว์เช่น ไก่ หมู วัว เป็นต้น ชีวมวลนับเป็นแหล่งพลังงานที่มีมากเป็นอันดับสี่ของโลก รองจากถ่านหิน ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติซึ่งสามารถให้พลังงานเท่ากับ 14% ของความต้องการพลังงานขั้นต้นของโลก [2] โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่มีศักยภาพสูงได้แก่ การใช้กากของเหลือในโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรเป็นเชื้อเพลิงในระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมกัน การใช้เชื้อเพลิงจากพืชอนุโลมได้ว่าเป็น วัฏจักรที่เป็นกลางทางคาร์บอน (Neutral Carbon) [2-4] กล่าวคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกนำกลับไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชจึงถือได้ว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศสุทธิเป็นศูนย์ และเนื่องจากปริมาณที่มีอยู่อย่างมากมายนี้เองชีวมวลจึงเป็นตัวเลือกสำคัญตัวหนึ่งที่จะสามารถนำมาพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์ได้ [2, 4] สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีพืชหลักที่ถือว่าเป็นพืชพลังงานอยู่ 8 ชนิด ได้แก่ อ้อย ข้าว มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน ถั่วเหลือง มะพร้าว และไม้ยูคาลิปตัส กระจายอยู่ทั่วประเทศ [5] โดยพบในรูปแบบต่างๆ เช่น เศษเหลือจากการเกษตร เศษเหลือจากอุตสาหกรรม โดยเศษเหลือจากการเกษตรบางส่วนจะถูกทิ้งไว้ในพื้นที่เพาะปลูกให้มีการสลายตัวเป็นอินทรีย์สารในดินและมีบางส่วนถูกเผาทำลายเพื่อเตรียมดินสำหรับทำเกษตรกรรมรอบต่อไป ส่วนของเศษเหลือในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มน้ำเพื่อปั่นกระแสไฟฟ้า เช่น ชานอ้อยของโรงงานน้ำตาล ทลายปาล์ม และแกลบ เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่ยังเป็นการใช้ที่มีประสิทธิภาพต่ำและมีอัตราการปล่อยมลพิษทางอากาศสูง

ลักษณะการนำชีวมวลไปใช้โดยตรงเช่น การใช้ฝืนในเตาสำหรับประกอบอาหาร การเผาชีเลื้อย แกลบ ชานอ้อย ในหม้อไอน้ำ หรือการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติก่อนนำไปใช้ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโดย (1) การเปลี่ยนทางกายภาพเช่นการลดขนาด การบดอัด การอบแห้ง ทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นลดลง มีความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) เพิ่มขึ้น มีความสะดวกในการจัดเก็บและขนย้าย (2) การเปลี่ยนทางเคมีหมายถึงการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และออกซิเดชัน (Oxidation) เช่นการทำถ่าน การทอริไฟร์ (Torrefy) การทำไพโรไลซิส (Pyrolysis) ก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) (3) การเปลี่ยนทางชีวภาพหมายถึงกระบวนการหมักเช่น การทำเอทานอล (Ethanol) มีเทน (Methane) อะซิโตบิวทานอล (Acetobylthanol) [2] โดยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องยนต์วัฏจักรแรงคิน เครื่องยนต์สันดาปภายในหรือการใช้เพื่อเป็นแหล่งความร้อน เช่นการหุงต้ม เป็นต้น ในการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานความร้อนทำได้โดยอาศัยกลไกทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาเทอร์โมเคมีโดยมีออกซิเจนเป็นสารซิโดซ์เซอร์ ซึ่งแบ่งเป็นการสันดาปโดยตรง (Direct Combustion) ซึ่งวิธีนี้ชีวมวลจะถูกเผาไหม้เผาอย่าง

สมบูรณ์ภายใต้สภาวะที่มีปริมาณอากาศส่วนเกิน เกิดความร้อนและแสงสว่าง โดยชีวมวลจะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และอีกรูปแบบหนึ่งเป็นกระบวนการที่ทำภายใต้การจำกัดออกซิเจน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน และกระบวนการเผาถ่าน (Carbonization) โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลภายใต้การควบคุมอากาศทำให้ชีวมวลสลายตัว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารระเหย หรือน้ำมัน โดยอุณหภูมิจะเป็นตัวกำหนดชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ส่วนกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนพลังงานที่อยู่ในชีวมวลแข็งให้อยู่ในรูปของก๊าซ ภายใต้การจำกัดออกซิเจนโดยอาศัยความร้อน (Endothermic) โดยทั่วไปประสิทธิภาพของก๊าซซิฟิเคชันจะอยู่ระหว่าง 60-90 % ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่าก๊าซสังเคราะห์ (Syngas or Producer Gas) [4] ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และมีเทน (CH₄) มีค่าความร้อน 3-5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ก๊าซที่ได้สามารถนำไปใช้สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในทั้งเครื่องยนต์ดีเซล (CI) และเบนซิน (SI) [3, 6] และการเผาไหม้เพื่อใช้ความร้อนในด้านต่างๆ นอกจากนี้ก๊าซสังเคราะห์ยังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีพวกเมทานอล Dimethyl ether (DME), methyl tert-butyl ether (MTBE) ได้อีกด้วย [7, 8]

ปัจจุบันการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการใช้เป็นแหล่งความร้อนเป็นที่สนใจของนักวิจัยจำนวนมาก ถึงแม้ว่าชีวมวลข้อจำกัดในการใช้ หลายอย่างเช่น มีค่าความหนาแน่นบัค (Bulk Density) และค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) ต่ำ มีความชื้นสูง และการดูดกลับความชื้น (Moisture Resorption) สูง กระบวนการต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติ การทำถ่านเป็นวิธีการแบบดั้งเดิม เป็นการไล่สารระเหยและน้ำออกไป ทำให้ได้ถ่านซึ่งมีค่าความร้อนสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ได้ผลผลิตต่ำมีมลสูญเสียมมากและค่าความหนาแน่นบัคลดลง [9] เพื่อลดการสูญเสียดังกล่าวจึงมีการพัฒนากระบวนการทอริฟิเคชันมา ชีวมวลทอริฟิเคชันมีค่าการดูดกลับความชื้นน้อยแต่ค่าความร้อนจะน้อยกว่าถ่าน [10, 11] นอกจากสองกระบวนการดังกล่าว การทำชีวมวลอัดแน่นได้ถูกนำมาใช้เช่นกัน ในการทำชีวมวลอัดแน่นจะมีการทำอยู่สามแบบ คือ ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบ (Pellet) ก้อนเชื้อเพลิง (Briquette) และการอัดในภาชนะบรรจุ [12-16] การทำชีวมวลอัดแน่นทำให้ค่าความหนาแน่นบัคและความหนาแน่นพลังเพิ่มขึ้น แต่ปัญหาใหญ่ของกระบวนการนี้คือค่าการดูดกลับความชื้นปริมาณสารระเหยมาก ความชื้นนี้จะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟต่ำและเกิดควันในการเผาไหม้มาก ซึ่งสารระเหยนี้เป็นอันตรายเกิดขึ้นเมื่อการเผาไหม้มีอุณหภูมิต่ำ ในกระบวนการอัดแน่นทั้งสามกระบวนการนี้ การทำก่อนชีวมวลและการอัดแน่นในภาชนะเป็นกระบวนการที่น่าสนใจมากที่สุดเพราะทำได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ แต่กระบวนการทั้งสองต้องมีการออกแบบเตาเผาที่เหมาะสม ซึ่งต้องสามารถทำการเผาไหม้ชีวมวลที่มีความชื้นสูงและมีอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่สูงด้วย เตาแบบร็อกเก็ต (Rocket Stove) เป็นเตาแบบดั้งเดิมที่ถูกออกแบบออกมาโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรงไปกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสในชีวมวล จากนั้นก๊าซไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจะถูกเผาไหม้กับออกซิเจนส่วนเกิน

ทำให้เกิดความร้อนออกมา เตาแบบรีอคเก็ตมีโครงสร้างอย่างง่าย ๆ สามารถใช้ได้กับชีวมวลในช่วงความชื้นที่กว้าง แต่จะเกิดสารระเหยออกมาเป็นจำนวนมากในทันทีทันใดทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้เตาแบบรีอคเก็ตไม่มีกลไกที่จะทำให้สารไฮโดรคาร์บอนใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ดังนั้นทาร์และก๊าซที่เป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อใส่ชีวมวลมากๆ เตาแบบก๊าซซิฟิเคชันเอร์เป็นเตาแบบหนึ่งที่มีความสนใจ แต่เตาแบบนี้ต้องใช้ชีวมวลที่ความชื้นต่ำๆ เท่านั้นเพราะจะเกิดทาร์มาก เมื่อชีวมวลมีความชื้นสูงหรืออีกนัยหนึ่งคือประสิทธิภาพเตาก๊าซซิฟิเคชันต่ำถ้าไม่ใช้พัดลมช่วยในการเผาไหม้ เตาแบบโฮลีย์ (Holey Stove) เป็นเตาที่อีกชนิดหนึ่งที่มีความสนใจ โดยชีวมวลชื้นเล็กๆ เป็นเชื้อเพลิง ตัวเตามีลักษณะทรงกระบอกมีรูเป็นช่องว่างอยู่ตรงกลาง การเผาไม่เกิดที่บริเวณผิวด้านในของก้อนชีวมวล ความร้อนจากการเผาไหม้ถูกส่งผ่านไปยังชีวมวลทำให้เกิดก๊าซไพโรไลซิส ก๊าซที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงและแตกตัวบริเวณที่เกิดการเผาไหม้การเผาไหม้จะเกิดควันมาก ถ้าเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง และต้องมีการเติมเชื้อเพลิงตลอดเวลาเพื่อให้การติดไฟเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เตาแบบโฮลีย์ไม่ต้องใช้พัดลมช่วย เตาแบบนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสและกลไกการแตกตัวของก๊าซไพโรไลซิส ถ้าใช้ก๊าซหุงต้มแทนฟืน การควบคุมการเผาไหม้จะทำได้ง่ายและเปลวมีเสถียรภาพดีกว่า

งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของเตาในลักษณะนี้ โดยจะศึกษาถึงอัตราการให้ความร้อน (Stove Heating Rate) ที่อัตราไหลต่างๆ ของก๊าซปิโตรเลียมเหลวและศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา นอกจากนี้จะศึกษาประสิทธิภาพของรวมทั้งทุนต้นเชื้อเพลิงต่อความร้อนใช้ประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการให้ความร้อนของเตาเผาแบบใช้ชีวมวลอัดในเตา โดยใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงร่วม

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ความร้อนของเตาเผาที่สร้างขึ้น

1.2.3 เพื่อศึกษาสมดุลความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาที่สร้างขึ้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การเผาไหม้ระหว่างชีวมวลอัดแห้งและปิโตรเลียมเหลวมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ความร้อน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 เต่าเผาพร้อมที่ใช้ในการทดลองเป็นเต่าเผาพร้อมชนิดอัดชีวมวลกับภาชนะและใช้หัวเต่า ก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ด้านล่างของเต่า

1.4.2 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยคือขี้เลื่อยไม้เบญจพรรณขนาด 1390±70 ไมโครเมตร ความชื้น 8.0-10.0%

1.4.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเต่าที่ใช้ในการศึกษามี 3 ค่า ได้แก่ 225 385 และ 550 มิลลิเมตร ความสูงของเต่ามีค่าคงที่ๆ 400 มิลลิเมตร

1.4.4 ในการศึกษาจะกำหนดให้อัตราการเผาไหม้ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวมีค่า เช่น 0.00 2.38×10⁻⁵ 3.33×10⁻⁵ และ 5.00×10⁻⁵ กิโลกรัมต่อวินาที และใช้ภาชนะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตรเป็นตัวแทนภาชนะรับความร้อนจากเต่า

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมองค์ความรู้เพื่อกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลองของระบบเต่าชนิดเผาพร้อมชีวมวลอัดและก๊าซปิโตรเลียมเหลว

1.5.2 ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อน และสมมูลพลังงานของเต่าชนิดเผาพร้อมชีวมวลอัดเม็ดและก๊าซปิโตรเลียมเหลว

1.5.3 จัดหาเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.5.4 ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเต่าเผากับประสิทธิภาพเชิงความร้อน สมมูลความร้อน และอัตราการใช้เชื้อเพลิง โดยแปรอัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็น 3 ระดับ

1.5.5 สรุปและการวิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมเขียนรายงานสรุปการวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.6.1 การทดลองจะถูกทำขึ้นในสถานะควบคุมให้อากาศมีการไหลเวียนแบบธรรมชาติโดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

1.6.2 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนในภาชนะ ได้จากการผลิตของห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

1.6.3 ไม่นำต้นทุนค่าเต่าเผาและค่าเครื่องจักรในการผลิตเชื้อเพลิงมาคิดในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ความร้อน

1.7 ความจำกัดของการวิจัย

ผลการวิจัยได้จากการจัดสภาพแวดล้อมให้อากาศไหลเวียนแบบธรรมชาติ ดังนั้นการใช้เตาเผาพร้อมในสภาพที่ลมพัดแรงอาจได้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนในภาชนะปิด หมายถึงชีวมวลที่ได้ทำการอัดลงในภาชนะปิดเป็นรูปทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางทรงกระบอก

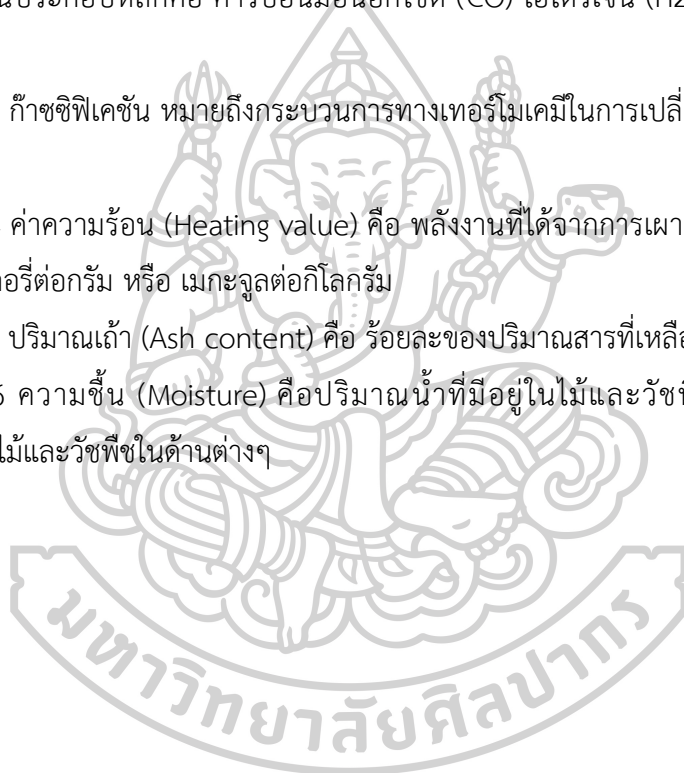
1.8.2 ก๊าซสังเคราะห์ (Syngas or Producer gas) หมายถึงก๊าซที่ได้จากกระบวนการก๊าซซิไฟเออร์มีส่วนประกอบหลักคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) และเอทิลีน (C₂H₄)

1.8.3 ก๊าซซิฟิเคชัน หมายถึงกระบวนการทางเทอร์โมเคมีในการเปลี่ยนชีวมวลที่เป็นของแข็งให้เป็นก๊าซ

1.8.4 ค่าความร้อน (Heating value) คือ พลังงานที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงหนัก 1 กรัม มีหน่วยเป็นแคลอรีต่อกรัม หรือ เมกะจูลต่อกิโลกรัม

1.8.5 ปริมาณเถ้า (Ash content) คือ ร้อยละของปริมาณสารที่เหลือจากการเผาเชื้อเพลิง

1.8.6 ความชื้น (Moisture) คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไม้และวัชพืช มีความสัมพันธ์ต่อคุณสมบัติของไม้และวัชพืชในด้านต่างๆ



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารชีวมวล

สารชีวมวลหมายถึงจำนวนของพืชและสัตว์ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลวก็ได้ในแง่ของแหล่งพลังงานสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ตามลักษณะของการใช้งาน คือ 1.ชีวมวลที่มีอยู่ตามปกติ (Conventional Biomass Resources) ได้แก่ ผลิตผลทางการเกษตร (Agriculture) ป่าไม้ ปศุสัตว์ การประมง เป็นต้น 2.เศษเหลือทางการเกษตร (Biomass Wastes Derivatives) ของเหลือจากภาคการเกษตร ป่าไม้ ประมง ฟางข้าว มูลสัตว์ ขี้เลื่อย เป็นต้น 3.ชีวมวลเพาะปลูกขึ้นมา (Plantation Biomass) พืชไม้เช่น ยูคาลิปตัส สน ตระกูลหญ้า (Herbaceous) เช่น อ้อย ข้าว ข้าวโพด พืชน้ำ ได้แก่ สาหร่ายเคลป์ยักษ์ (Giant kelp) สาหร่าย (Algae) [2] โดยในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องเฉพาะพืชชีวมวลที่เป็นของแข็งเท่านั้น

2.2 องค์ประกอบของสารชีวมวลมีดังนี้

ชีวมวลโดยทั่วไปมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นวัสดุประเภทพอลิโนเซลลูโลส มีโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบหลักได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล

2.2.1 เซลลูโลส คือ โพลีเมอร์ ของ β -glucose ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตาไกลโคซิดิก มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ n คือจำนวนของกลูโคสที่มาต่อกันหรือดีกรีของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization:DP) ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน ตั้งหลักพันหน่วยจนถึงหลายหมื่นหน่วย เซลลูโลสเป็นส่วนที่เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช เป็นโมเลกุลยาวและแข็ง เมื่อย่อยจะได้เซลลูไบโอส และสุดท้ายเป็น ดีกลูโคส (มอโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลลัพธ์เป็นไดแซคคาไรด์ เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึกและต้านทานต่อกรดและด่าง

2.2.2 เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่แทรกและยึดตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสในผนังเซลช่วยเพิ่มความแข็งแรง ประกอบไปด้วยหน่วยน้ำตาลเพนโทสในสัดส่วนที่มากกว่ากลูโคส สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยคือ $(C_5H_8O_4)_n$ เนื่องจากดีกรีพอลิเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50-200 ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสามารถละลายได้ในสารละลายเบสโดยสามารถละลายได้ในสารละลายโซดา 17.5% ที่อุณหภูมิต่ำ

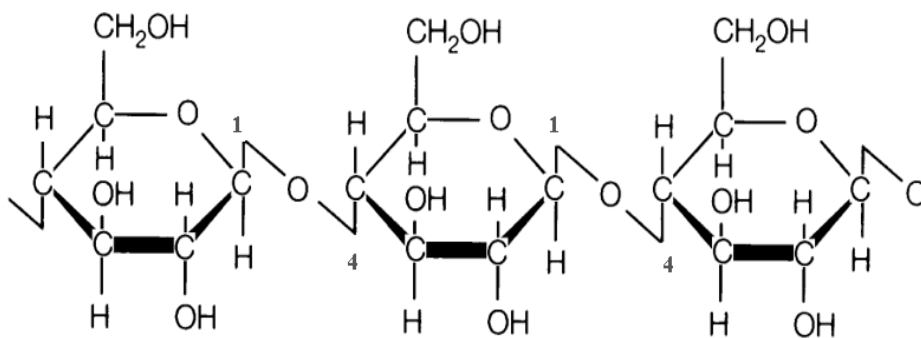
2.2.3 ลิกนิน (Lignin) เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{49}H_{52}O_{14}$ โครงสร้างจะประกอบวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ฟีนอลที่มีและไม่มีหมู่เมธิล

ยูนิตพินิลโพรเพนและอนุพันธ์ เชื่อมกันเป็นสามมิติมีโครงสร้างซับซ้อนและยังไม่มีระเบียบ โครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลินทรีย์และสารเคมี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงทางกล และลิกนินถูกพบทั่วไปในสารชีวมวลชนิดต่างๆ และแหล่งคาร์บอนตามธรรมชาติจำนวนมาก

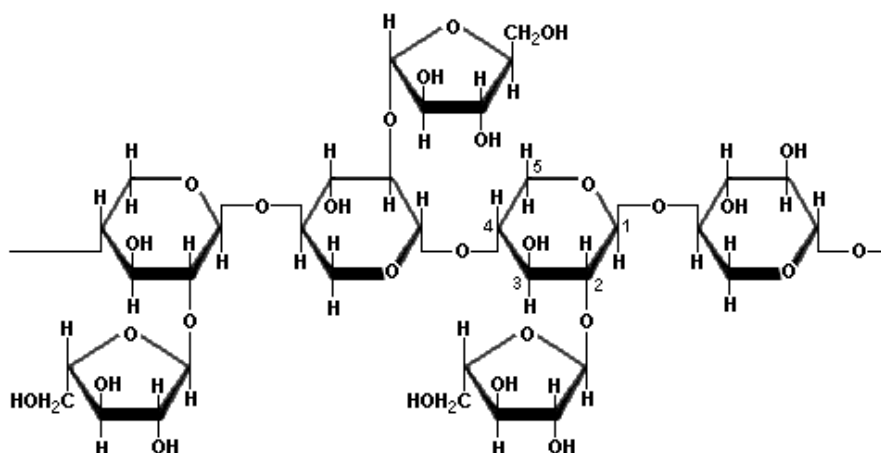
2.2.4 แป้ง เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของดี-กลูโคส ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟา-กลูโคไซด์ิก แป้งจะประกอบไปด้วยส่วนที่ละลายได้ในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณ 10-20% ของแป้ง) และบางส่วนที่ไม่ละลาย แป้งถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้น ซึ่งถือเป็นอาหาร

2.2.5 โพรตีน เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกพอลิเมอไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโน และลำดับของพอลิเมอไรเซชัน โพรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่าสามสารข้างต้นที่กล่าวมา

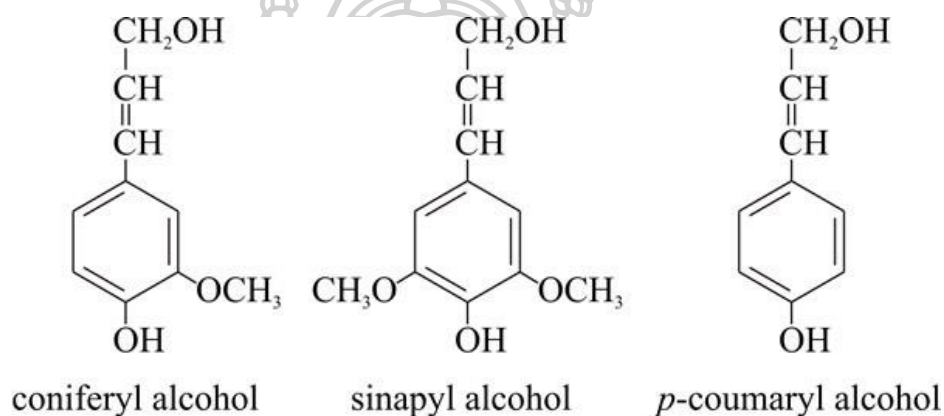
2.2.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์) มีสารประกอบทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์หลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับโดยขึ้นอยู่กับชนิดของพืช สารอินทรีย์ที่พบจำนวนมากได้แก่ กลีเซอรอล พบได้ในน้ำมันผักกาดก้านขาว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ และซูโครสพบมากในอ้อย



(ก).เซลลูโลส (Cellulose)



(ข).เฮมิเซลลูโลส (Hemi-Cellulose)



(ค).ลิกนิน (Lignin)

รูปที่ 2.1 (ก).เซลลูโลส (ข).เฮมิเซลลูโลสและ (ค).ลิกนิน (ที่มา Jagtoyen et al.(1998))

2.3 คุณสมบัติของสารชีวมวลและการวิเคราะห์

2.3.1 การวิเคราะห์ แบบพร็อกซิเมต (Proximate Analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยรวมของเชื้อเพลิงโดยค่าการวิเคราะห์ที่ได้คือ ความชื้น (M) สารระเหย (VM) ซี้้เถ้า (A) ฟิกซ์คาร์บอน (C)

2.3.2 การวิเคราะห์ แบบอัลติเมต (Ultimate Analysis) เป็นการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิง โดยทั่วไปธาตุที่พบในชีวมวลประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ และให้ค่าความชื้นเป็นศูนย์ (Dry basis) ตาราง 2.1 เป็นตัวอย่างการวิเคราะห์ของไม้ชนิดหนึ่ง หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มวล มีผลวิเคราะห์แบบ Proximate และ Ultimate

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ไม้ซี้วมวล

Wood composition in mass %			
Proximate analysis		Ultimate analysis	
Fixed carbon	31.46	Carbon	49.59
Volatile	56.39	Hydrogen	6.28
Moisture	9.71	Oxygen	43.74
Ash	2.44	Nitrogen	0.39
		Sulfur	0.00

ที่มา: Janajreh and Al Shrah (2013) [8]

2.3.3 ปริมาณความร้อนซี้วมวล คือปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ของซี้วมวล แบ่งเป็นค่าความร้อนสูง (HHV) และค่าความร้อนต่ำ (LHV) แต่เนื่องจากซี้วมวล ประกอบไปด้วยความชื้น และเถ้าจำนวนมาก เมื่อนำมาผลิตเป็นพลังงานการประมาณค่าความร้อนต่ำ ไม่สามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงสถานะการใช้งานได้ เนื่องจากความร้อนจะถูกดูดไปโดยเถ้า และอากาศ รอบๆ ค่าความร้อนพร้อมใช้งานสามารถประมาณได้ดังสมการต่อไปนี้ ความร้อนพร้อมใช้งาน

$$(Q) = Q_0 (1-w) - 1000 W - [\text{ความร้อนที่ถูกดูดในอากาศ}] - [\text{ความร้อนที่ถูกดูดในเถ้า}] \quad (2.1)$$

Q_0 คือ ค่าความร้อนจากการเผาไหม้






W คือ ปริมาณความชื้น

ที่มา: คู่มือซี้วมวลเอเชีย

ค่าความร้อนของซี้วมวลสามารถหาโดยวิธีการคำนวณเมื่อรู้จำนวนและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซี้วมวลได้ หรือสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ โดยใช้เครื่องมือเช่น วิธีบอมคาร์ลอร์มิเตอร์ (Bomb Calorimeter) มีหน่วยเป็น เมกะจูลต่อกิโลกรัม

2.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของซี้วมวล

เนื่องจากซี้วมวลที่ปรากฏตามธรรมชาตินั้นไม่สะดวกในการใช้งาน เช่น มีปริมาณความชื้นสูง ค่าความหนาแน่นบึ๊ก (Bulk Density) ต่ำ ขนาดไม่สม่ำเสมอ จำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติทั้งด้านเคมีและกายภาพ เช่น การลดขนาด การลดความชื้น โดยการตากแห้ง การอบแห้ง ด้านกายภาพทำได้หลายวิธี เช่นการบด (Milling) การตัด (Cutting) และการอัดแท่งตะเกียบ (Pelleting) เป็นต้น รูปที่ 2.2 แสดงถึงลักษณะทางกายภาพและข้อมูลทางเทคนิคของซี้วมวล

	saw dust 	wood chips 	wood log 30-50cm length not piled up - piled up 	wood logs 100 cm length piled up 	pellets from saw dust or wood chip 
specific weight kg/m ³	120 - 180	160 - 250	250 - 500	300 - 500	400 - 600
weight per unit kg	—	- 0,2	0,4 - 2,5	3 - 25	0,03 - 0,2
yearly storage room de- mand average dwelling m ³	105 - 140	70 - 105	40 - 105	40 - 70	35 - 50
aptitude for short-dis- transporting long- distance	++ +	++ +	+ 0	+ +	++ ++
charging of combustion chamber	mechanical and by hand	mechanical and by hand	by hand	by hand	mechanical and by hand
possibility of charging by hand	0	0	+	++	+
automatic control of charging	+	++	—	—	+
possibility for power regulation	++	(0 underb.) ++	0	0	(++ ++)
usual charging - and re- commendable combustion systems	interm. special stoves contin. in wood chip comb.	coarse wood chips, underburn., all wood chip combustions with cont. charging, most preferna burning	interm. under- burning	intermitt. underburn- ing or through burning	intermittently underburning or cont. wood chip comb.
notice : ++ = very suitable + = suitable 0 = possible - = less suitable					

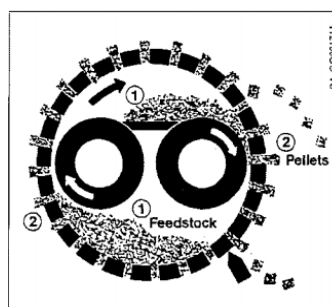
Dr. Strehler

Forms of Wood for Combustion
 Combined Problems

รูปที่ 2.2 ลักษณะต่างของไม้ที่ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิง ที่มา: A Strehler (2000) [17]

2.4.1 การอัดแท่ง (Densifying)

การอัดแท่งชีวมวลมีวัตถุประสงค์เพิ่มความหนาแน่นให้แก่ชีวมวลซึ่งใช้กับชีวมวลขนาดเล็กหรือต้องย่อยชีวมวลให้มีขนาดเล็กเสียก่อน การอัดทำที่อุณหภูมิสูงโดยลิกนินทำหน้าที่เป็นตัวประสานประโยชน์ที่ได้จากการอัดคือปริมาตรที่ลดลง ความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น สะดวกในการจัดเก็บและการขนส่ง โดยปกติชีวมวลจะมีความหนาแน่นบดต่ำประมาณ 1/2 - 1/10 ของถ่านหินซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบอย่างหนึ่ง การอัดแท่งเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมจะเป็นการลดข้อเสียเปรียบตรงนี้ พลังงานที่ใช้ในการอัดแท่งประมาณ 1-2% ของพลังงานที่อยู่ในชีวมวลดิบ (Raw biomass) ความหนาแน่นบดที่ได้อยู่ในช่วง 400-700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รูปที่ 2.3 เป็นหลักการทำงานเครื่องอัดแท่งชีวมวลชนิดหนึ่ง



รูปที่ 2.3 กระบวนการอัดแท่งชีวมวลชนิดหนึ่ง ที่มา: Reed (1988)

Fuel	Grading	Bulk Density kg/m ³	Reference
Sawdust	loose	177	(1)
Sawdust	briquets 100 mm long 75 mm diameter	555	(1)
Peat	dust	350-440	(2)
	briquets 45 x 65 x 60 mm	350-620	(2)
	hand cut	180-400	(2)
Charcoal (10% moisture)	beech	210-230	(3)
	birch	180-2003	(3)
	softwood blocks	150-170	(3)
	softwood slabs	130-150	(3)
	mixed 60% hard/40% soft	170-190	(3)
Wood	hardwood	330	(3)
	softwood	250	(3)
	mixed 50/50	290	(3)
Straw	loose	80	—
	bales	320	—
Alfalfa seed straw	cube 30 x 30 x 50 mm, 7% moisture	298	(4)
Barley straw	cube 30 x 30 x 50 mm, 7% moisture	300	(4)
Bean straw	cube 30 x 30 x 50 mm, 7% moisture	440	(4)
Corn cobs	11% moisture	304	(4)
Corn stalks	cube 30 x 30 x 50 mm	391	(4)
Cotton gin trash	23% moisture	343	(4)
Peach pits	11% moisture	474	(4)
Olive pits	10% moisture	567	(4)
Prune pits	8% moisture	514	(4)
Rice hulls	cube 30 x 30 x 50 mm	679	(4)
Safflower straw	cube 30 x 30 x 50 mm	203	(4)
Walnut shells	cracked	336	(4)
	8 mm pellets	559	(4)
Wood, blocks	17% moisture	256	(4)
chips	10% moisture	167	(4)
Coal	anthracite	830-900	(1)
	bituminous	770-930	(1)
Coke	hard	380-530	(1)
	soft	360-470	(1)
Brown coal	air dry lumps	650-670	(1)

(1) Rambush, N. E., *Modern Gas Producers*, New York: Van Nostrand, 1923.

(2) Ekman, E. and Asplund, D., *A Review of Research of Peat Gasification in Finland*, Technical Research Centre of Finland, Fuel and Lubricant Research Laboratory, Espoo, Finland.

(3) *Generator Gas, The Swedish Experience From 1939-1945*, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, SERI/SP 33-140, 1979.

(4) Jenkins, B. M., *Downdraft Gasification Characteristics of Major California Residue-Derived Fuels*, Ph.D. Thesis, Department of Engineering, University of California, Davis, 1980.

Source: Kaupp 1984a

รูปที่ 2.4 แสดงค่าความหนาแน่นบักของชีวมวลชนิดต่างๆ

ที่มา: Kaupp 1984a

2.4.2 การอัดก้อนหรือก้อนเชื้อเพลิง (Briquettes)

เป็นการนำชีวมวลมาอัดให้เป็นก้อนเพื่อให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแต่จะน้อยกว่าการอัดแท่งสามารถอัดขึ้นเป็นรูปทรงต่างๆ เพื่อให้มีความสะดวกในการใช้งาน ก้อนเชื้อเพลิงนี้จะมี ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) เพิ่มขึ้นด้วย ในการอัดต้องใช้ตัวประสานเพื่อยึดชีวมวลเข้าด้วยกันโดยอาจใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน ชีวมวลที่สามารถนำมาอัดก้อนได้แก่ เช่น ชี้เลื่อย ฟาง ข้าว ผักตบชวา เป็นต้น

2.4.4 การอัดในภาชนะ

เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการใช้ชีวมวลในลักษณะของการอัดโดยใช้ได้ในกรณีที่ชีวมวลมีขนาดเล็ก เช่น ชี้เลื่อยการอัดในลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวประสาน มีการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ทางความร้อนขนาดเล็ก เช่นเตาที่ใช้สำหรับประกอบอาหาร ซึ่งในการวิจัยนี้จะเป็นการใช้ในลักษณะนี้

2.4.5 การอบแห้ง

หมายถึงการไล่ปริมาณความชื้นหรือน้ำออกจากชีวมวลเพื่อให้ชีวมวลมีคุณสมบัติดีขึ้นมีค่าความร้อนสูงขึ้น

ปริมาณน้ำรวมในระบบชีวมวลหมายถึง ความชื้นจากชีวมวล ความชื้นในพันธะเคมี (Chemical bound water) ของชีวมวล และความชื้นในอากาศ ในการระเหยน้ำออกจากชีวมวลต้องใช้ความร้อน 1,500 กิโลจูลต่อกิโลกรัม [3]

สูตรชีวมวลของไม้แห้ง สามารถพิจารณาได้เป็นแหล่งของน้ำ ดังนี้



ดังนั้นสามารถกำหนดความชื้นทางเคมี (Chemical moisture) ได้เป็น

$$M_C = \frac{\text{Chemical Moisture}}{\text{Fuel-Weight}} \quad (2.3)$$

$$= \frac{(0.6)(2)(1) + (16) \times (100\%)}{12 + (0.2)(1) + 0.6[(2)(1) + 16]}$$

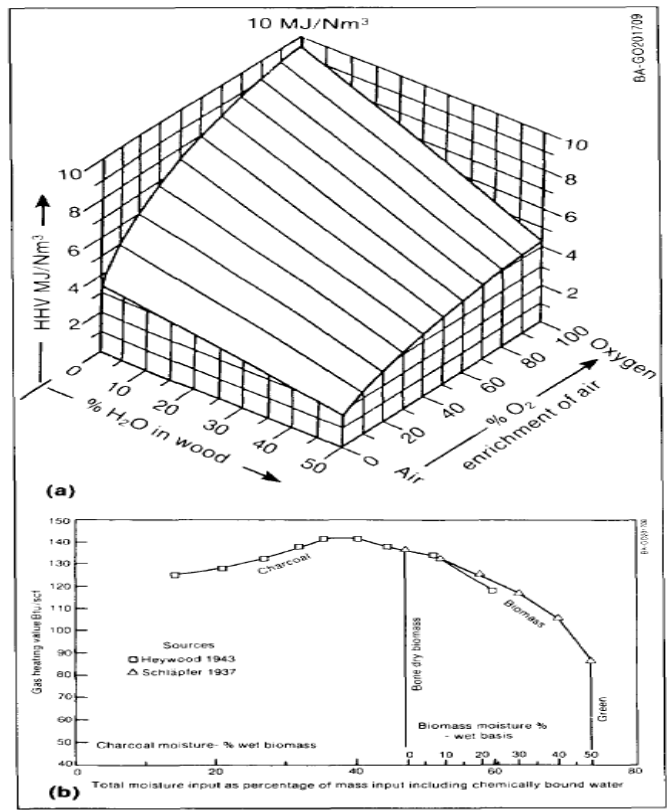
= 47% ดังนั้นน้ำที่ติดไปกับเชื้อเพลิงทั้งหมด (M_T) คือ

$$M_T = \frac{\text{Fuel Moisture} + \text{Chemical Moisture}}{\text{Wet Fuel Weight}} \times M_F \quad (2.4)$$

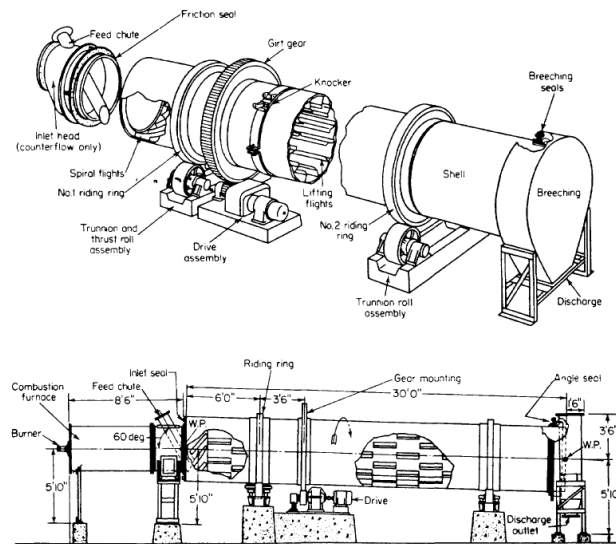
$$= M_C + \frac{(100 - M_C)}{100} \times M_F \quad (2.5)$$

$$= 47 + 0.53M_F \quad ; M_F = \% \text{ความชื้นของเชื้อเพลิง} \quad (2.6)$$

ในรูปที่ 2.4 แสดงผลของความชื้นของชีวมวลต่อระบบก๊าซซีพีเอ็นเออร์ รูปที่ 2.4 (a) จะเห็นว่าค่าความร้อนของก๊าซจะเพิ่มสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นของชีวมวลที่เพิ่มขึ้น โดยมีจุดสูงสุดอยู่ระหว่าง 30-40% จากนั้นค่าความร้อนก๊าซจะเริ่มลดลง จะเห็นว่าปริมาณน้ำทางเคมีที่มีอยู่ 47% ก็เกินจุดสูงสุดของความต้องการน้ำแล้วดังนั้นน้ำที่เหลือจะทำให้ค่าความร้อนของก๊าซลดลง การอบแห้งชีวมวลสามารถใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือได้จากความร้อนทิ้งก็ได้ รูปที่ 2.4 เป็นเครื่องอบแห้งไม้ชนิดหนึ่ง



รูปที่ 2.5 (a) ผลของความชื้น (น้ำ) และออกซิเจนต่อค่าความร้อนของก๊าซ (b) ผลของความชื้น (น้ำ) ทั้งหมดต่อค่าความร้อนของก๊าซ ที่มา: (a): Overend 1982, รูป 5B (b) Reed (1988)



รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งชนิด แบบใช้ความร้อนตรง ชนิดโรตารีดรัม (Rotary drum dryer) ที่มา: Perry 1973

2.5 การเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีและความร้อนของสารชีวมวล

2.5.1 ไพโรไลซิส

ไพโรไลซิสเป็นกระบวนการทางเทอร์โมเคมีที่ย้อนกลับไม่ได้ ชีวมวลเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศแบบไร้ออกซิเจน ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นขั้นๆ แล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนของก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ของแข็งที่ได้เรียกว่าถ่าน (Charcoal) ส่วนของเหลวที่ได้มีสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ เรียกว่าน้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-crude oil) กระบวนการไพโรไลซิสสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะใดมากกว่าได้โดยควบคุมปัจจัยที่สำคัญเช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

2.5.1.1 ไพโรไลซิสแบบช้า เป็นการให้ความร้อนอย่างช้าๆ โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 500°C เป็นกระบวนการที่มีทำกันมานานแล้วเรียกการเผาถ่าน (Carbonization) หากมีการควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำและใช้เวลานานก็จะได้ผลผลิตถ่านมากขึ้น

2.5.1.2 ไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว จะได้สารระเหย ก๊าซ และของเหลว ซึ่งเรียกว่าไพโรไลซิสเร็วหรือเร็วมาก (Fast/Flash pyrolysis) โดยทั่วไปจะได้ผลผลิต เป็นน้ำมันชีวภาพประมาณ 60-70% ถ่าน 15-25% และก๊าซเบาที่ไม่ควบแน่น 10-20% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมดการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วทำให้เกิดถ่านน้อยหรือบางสภาวะสามารถลดการเกิดถ่านได้หมด

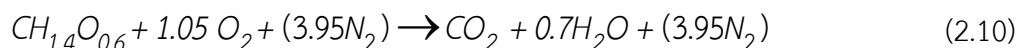
2.5.2 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นกระบวนการทางเทอร์โมเคมีที่ชีวมวลทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนแล้วให้ความร้อนและแสงสว่าง การเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete Combustion) เป็นกระบวนการที่ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจนหมดได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ในกรณีที่ชีวมวลมีซัลเฟอร์อยู่ในองค์ประกอบ) และน้ำ ปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์มีดังนี้



ในการเผาไหม้จริงจะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น (Incomplete Combustion) ขึ้นเนื่องจากลักษณะของการเผาไหม้ทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH_4) ดังนั้นในกระบวนการเผาไหม้ทั่วไปจึงกำหนดให้มีปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air)

การเผาไหม้ชีวมวลจะมีความซับซ้อนกว่าไฟโรไลซิสหรือก๊าซซิฟิเคชัน โดยในขั้นแรกจะเกิดการไฟโรไลซิสและก๊าซซิฟิเคชันบางส่วน (Partially combusted) แล้วจึงเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ชีวมวลสามารถพิจารณาได้เป็น



โดย $CH_{1.4}O_{0.6}$ เป็นสูตรเคมีทั่วไปของชีวมวล ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะได้ค่าความร้อนสูงประมาณ 20.9 กิโลจูลต่อกรัม ในทางปฏิบัติความชื้นของชีวมวลจะระเหยและใช้ความร้อนส่วนหนึ่งสำหรับการระเหยค่าความร้อนที่ได้จะเป็นค่าความร้อนต่ำ ความแตกของค่าความร้อนต่ำและสูงขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของชีวมวล ถ้าค่าความชื้นสูงค่าความแตกต่างก็จะมาก (ในอเมริกานิยมใช้ค่าความร้อนสูงบอกถึงประสิทธิภาพเตา ส่วนในยุโรปใช้ค่าความร้อนต่ำ)

2.5.3 ก๊าซซิฟิเคชัน

2.5.3.1 ปฏิกิริยาทางเคมีของก๊าซซิฟิเคชัน

ปฏิกิริยาในอุดมคติ (Ideal) ของก๊าซซิฟิเคชันคือการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นก๊าซตามสมการข้างล่าง



ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจึงต้องให้ความร้อนจากแหล่งภายนอก เมื่อให้ออกซิเจนส่วนเกินจะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ ดังนี้



และโดยทั่วไปจะมีเอนทัลปีเกิดขึ้นเล็กน้อย ปฏิกิริยาเคมีโดยทั่วไปของก๊าซซิฟิเคชันมีดังนี้

การเผาไหม้



ขั้นปฏิกิริยา



ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากก๊าซซีพีเออร์

ชื่อ	สัญลักษณ์	% ก๊าซโดยปริมาตร	% ก๊าซแห้งโดยปริมาตร
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	21	22.1
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	9.7	10.2
ไฮโดรเจน	H ₂	14.5	15.2
น้ำ (ไอ)	H ₂ O	4.8	-
มีเทน	CH ₄	1.6	1.7
ไนโตรเจน	N ₂	48.4	50.8
HHV		5,506 kJ/Nm ³	5,800 kJ/Nm ³
อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของก๊าซซีพีเออร์			2.38 kg _{wood} /kg _{air}
อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของก๊าซซีพีเออร์			1.15 kg _{wood} /kg _{air}

ที่มา: ดัดแปลงจาก Reed (1988)

หมายเหตุ: 1. ค่า HHV โดยทั่วไปของก๊าซซีพีเออร์แบบไหลลง จะอยู่ระหว่าง 4,880-7320 kJ/Nm³

2. ส่วนประกอบก๊าซเปียกมีความสำคัญในการคำนวณสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน

2.5.3.2 เทอร์โมไดนามิกของก๊าซซีพีเออร์

เทอร์โมไดนามิกใช้สำหรับทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ผลได้สารผลิตภัณฑ์ C, CO, CO₂, CH₄, H₂ และ H₂O ของก๊าซซีพีเออร์เคชันสามารถทำนายโดยใช้สมการสมดุลที่ความดันคงที่ จำนวนของธาตุและค่าคงที่สมดุลทำนายจากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกและอุณหภูมิจึงสามารถใช้ทำนายสารที่เพิ่มเข้าไปในระบบ

ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในขบวนการก๊าซซีพีเออร์เป็นตัวบอกถึงผลได้ของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิจึงใช้ ปริมาณของออกซิเจนบอกในรูปอัตราส่วนสมดุล (Equivalence ratio) ค่าอัตราส่วนอากาศที่เกิดการเผาไหม้กับชีวมวลได้พอดีคือ 1.476 มวลของออกซิเจนต่อมวลของชีวมวล หรือ 6.36 เมื่อใช้อากาศที่ค่าอัตราส่วนอากาศต่างๆ เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ค่าอัตราส่วนอากาศที่ 0.25 เกิดก๊าซซีพีเออร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ถ้าค่าน้อยกว่าจะเกิดไพโรไลซิสได้ถ่านมากกว่าก๊าซจะเกิดการเผาไหม้ได้ความร้อนสูง การเผาไหม้เกิดเมื่อค่าอัตราส่วนสมดุล มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ค่า

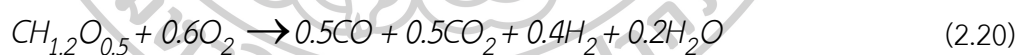
2.5.3.3 หลักการของก๊าซซิไฟรเออร์แบบตรง (Direct Gasification)

ขั้นตอนของก๊าซซิไฟรเออร์ประกอบด้วยขั้นตอนแห้งไพโรไลซิส เฟลมมิงไพโรไลซิส ออกซิเดชัน และ รีดักชัน ขั้นตอนไพโรไลซิสจะให้สารระเหยจากไม้ไม่เสถียรที่อุณหภูมิ 600°C และ แยกตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 700-800°C เป็นไฮโดรคาร์บอน H_2 CO และ CO_2

ไพโรไลซิสและก๊าซซิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยใช้ความร้อน 1.6-2.2 กิโลจูลต่อกรัม ในปฏิกิริยาไพโรไลซิสและการยกอุณหภูมิชีวมวลขึ้นถึง 600°C ซึ่งคิดเป็น 6-10% ของการเผาไหม้ชีวมวลแห้ง [3] ความร้อนนี้ได้โดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชีวมวล ข้อได้เปรียบของก๊าซซิไฟรเออร์แบบตรงคือความง่ายของระบบจบในขั้นตอนเดียวและการมีถ่ายเทความร้อนโดยตรงจากก๊าซไปยังชีวมวลมีประสิทธิภาพสูง ก๊าซได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 5,800-7,700 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรและ 11,500 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ที่ภาวะมาตรฐานเมื่อใช้อากาศและออกซิเจนเป็นออกซิไดเซอร์ตามลำดับ

2.5.3.4 หลักการเดินเครื่องก๊าซซิไฟรเออร์แบบตรง

ในกระบวนการไพโรไลซิสจะได้สารระเหยประมาณ 80% ของชีวมวลตั้งต้น หลักการของก๊าซซิไฟรเออร์คือการเปลี่ยนสารระเหยให้เป็นก๊าซที่มีความเสถียรและอีกหน้าที่หนึ่งคือการเปลี่ยนถ่านที่เกิดขึ้นให้เป็นก๊าซอย่างเดียวกัน ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ที่สำคัญๆ จะเป็นก๊าซซิไฟรเออร์แบบไหลลงและไหลขึ้น แบบไหลขึ้นสามารถใช้ได้กับชีวมวลที่มีความชื้นสูงกว่าแบบไหลลงแต่จะมีน้ำมันดินสูงกว่าเหมาะกับใช้เผาไหม้ทั่วไปไม่เหมาะกับการใช้ในเครื่องยนต์ รูปที่ 2.6 เป็นรูปที่แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในก๊าซซิไฟรเออร์แบบไหลลงจะเกิดขึ้นเฟลมมิงไพโรไลซิสจะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ และน้ำมันดินจะถูกใช้ไปถึง 99% การเกิดปฏิกิริยาแสดงในสมการ

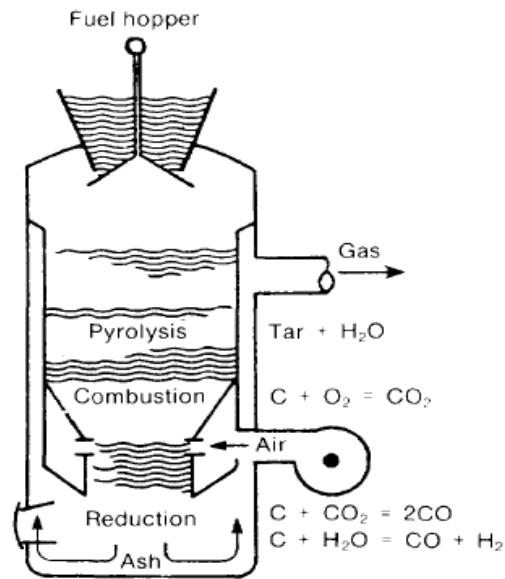


$CH_{1.2}O_{0.5}$ คือ น้ำมันของชีวมวล

2.5.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของการเดินเครื่องก๊าซซิไฟรเออร์

อุณหภูมิการเดินเครื่องของก๊าซซิไฟรเออร์เป็นฟังก์ชันของปริมาณออกซิเจนที่ใช้ อุณหภูมิจะเปลี่ยนอย่างทันทีทันใดที่ค่าอิกวิวาเลนต์เรโซว (Equivalence ratio) ประมาณ 2.5 ซึ่งจุดเปลี่ยนนี้จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 600-800°C ขึ้นอยู่กับแหล่งออกซิเจน การไพโรไลซิสจะให้น้ำมันและน้ำมันดินที่เสถียรที่เป็นเวลา 1 วินาทีหรือมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600°C ก๊าซซิไฟรเออร์แบบไหลลงมีอุณหภูมิต่ำกว่า 600°C ดังนั้นจึงมีน้ำมันดินติดมากับก๊าซ

จากรูป 2.6 อากาศถูกส่งเข้าไประหว่างรอยต่อของชีวมวลที่ไหลลงและชั้นกองถ่าน ถ้าปริมาณถ่านมีมากอากาศก็จะทำปฏิกิริยากับถ่านมากกว่าชีวมวล ถ้าถ่านมีน้อยอากาศก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับชีวมวลดังนั้นในก๊าซซิไฟรเออร์แบบอิมเบิร์ตจะเป็นการควบปฏิกิริยาโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 2.7 เตาถ้ำซีไฟร์เออร์แบบอิมเบิร์ด ที่มา: Reed 1988

2.6 สมดุลพลังงานของอุปกรณ์

การพิจารณาปริมาณควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลกับสิ่งแวดล้อม ทำให้มีพลังงานส่วนหนึ่งไหลเข้าและออกไปพร้อมกับการถ่ายเทของมวล ซึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาณควบคุม โดยอาศัยหลักการของกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ดังสมการ

$$Q_{cv} - W_{cv} + \sum E_{in} - \sum E_{out} = \Delta E_{cv} \quad (2.21)$$

เมื่อ Q_{cv} คือพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาณควบคุม

W_{cv} คืองานทั้งหมดที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาณควบคุม

$\sum E_{in}$ คือพลังงานทั้งหมดของมวลที่ไหลเข้าปริมาณควบคุม

$\sum E_{out}$ คือพลังงานทั้งหมดที่ไหลออกจากปริมาณควบคุม

ΔE_{cv} คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสุทธิในปริมาณควบคุม

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$Q_{cv} - W_{cv} + \sum m_i \left(h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gZ_i \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad (2.22)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณควบคุม คือ เครื่องปฏิกรณ์และระบบของเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) จะสามารถหาสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องปฏิกรณ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$[\text{พลังงานความร้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์}] = [\text{พลังงานความร้อนไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์}]$$

$$\Sigma Q_i = \Sigma Q_e \quad (2.23)$$

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ประกอบด้วย

1. ความร้อนจากเชื้อเพลิง (Q_f)

ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นพลังงานความร้อนหลักของเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณจากมวลในการป้อนเชื้อเพลิงกับค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง (High Heating value, HHV) โดยค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงจะพิจารณา น้ำที่ได้จากการเผาไหม้ที่อยู่ในสถานะของเหลว แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของไอเสียจะสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำให้น้ำที่มีอยู่ในไอเสียมีสถานะเป็นก๊าซ ดังนั้นจึงนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (Low heating value, LHV) มาใช้ในการคำนวณดังสมการ

$$Q_f = m_f + LHV \quad (2.24)$$

เมื่อ m_f คือมวลเชื้อเพลิงที่ป้อน (kg)

LHV คือค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (kJ/kg)

Q_f คือความร้อนจากเชื้อเพลิง (kJ)

พลังงานความร้อนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบด้วย

1. ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{icp})

ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ คำนวณได้โดยอาศัยปริมาณความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ หากในระบบนั้นเกิด CO แทนที่ CO₂ เกิดขึ้นนั้นจะพบว่า 1 kg ของคาร์บอนนั้นจะปล่อยพลังงาน 10,120 กิโลจูล (kJ) ของความร้อนที่เผา CO ขณะที่ปล่อย 33,800 kJ ต่อ 1 kg ในการเผาไหม้ CO₂ ดังนั้น ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ของ 1 กิโลกรัมของคาร์บอนเท่ากับ 33,800-10,120 = 23,680 kJ

เมื่อ CO เป็นตัวบอกว่าเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในระบบ เมื่อรู้ %CO CO₂ และ C แทนสัดส่วนของคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg

ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนต่อกิโลกรัมของเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{icp} = \frac{CO \times C}{CO_2 + CO} \times 23,680 \quad (2.25)$$

เมื่อ CO, CO_2 คือ %โดยปริมาตรของไอเสีย

C คือ สัดส่วนของคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg

Q_{icp} คือ ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ)

2. ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่หมด (Q_{ub})

การสูญเสียในกรณีเกิดกับเชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น คือเมื่อเชื้อเพลิงแข็งเกิดการสันดาป ขนาดของมวลจะมีขนาดเล็กลง ถ้าเล็กมากก็จะตกตะกอนของเตาสูงสู้นเตากลายเป็นขี้เถ้า ทำให้เชื้อเพลิงถ่ายเทความร้อนได้เต็มที่ หาได้จาก

$$Q_{ub} = (33,826 \times m_r) \times C_r \quad (2.26)$$

- เมื่อ m_r คือ มวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดปราศจากขี้เถ้า (kg)
 C_r คือ องค์ประกอบของคาร์บอนในเชื้อเพลิง (kg)
 Q_{ub} คือ ความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด (kJ)

3. ความร้อนจากความชื้นในเชื้อเพลิง (Q_{mt})

ความชื้นในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนทำให้กลายเป็นไอแล้วถูกพาออกไปพร้อมกับก๊าซไอเสีย หาได้จาก

$$Q_{mt} = m_{H_2O} Q_{mt} = m_{H_2O} \int_{\alpha}^{T_s} \bar{C}_{p,H_2O} dT \quad (2.27)$$

- เมื่อ m_{H_2O} คือ มวลของความชื้นในก้อนพลังงาน (kg)
 \bar{C}_{p,H_2O} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ โดยอยู่ในรูปสมการ
 $143.05 - 183.54\theta^{0.25} + 82.751\theta^{0.5} - 3.6989\theta$
 θ คือ อุณหภูมิ (K)/100
 Q_{mt} คือ ความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง (kJ)

4. ความร้อนสูญเสียที่ผิวของเครื่องปฏิกรณ์ (Q_{sf})

การสูญเสียความร้อนที่ผิวเกิดจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวเครื่องปฏิกรณ์กับบรรยากาศภายนอก โดยกลไกการถ่ายโอนความร้อนแบบการพา (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการพาความร้อนเกิดขึ้นจากผลของการนำความร้อนรวมกับการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาทำให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เช่น การใช้พัดลมเป่าอากาศ การใช้ปั๊มน้ำ ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่

การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) การเคลื่อนที่ของของไหล เกิดจากแรงลอยตัว (Buoyancy force) อันเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลทำให้ความหนาแน่นของของแตกต่างกัน

$$Q = Q_{convec} + Q_{rad} \quad (2.28)$$

$$\text{โดย } Q_{conc} = \Sigma h A_s (T_s - T_\alpha) \quad (2.29)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (W/m^2K)

A_s คือ พื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิที่พื้นผิว ($^{\circ}C$)

T_α คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$)

ในการคำนวณเพื่อที่จะหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพา (h) จะต้องเลือกสมการที่เหมาะสม กับค่า h ของผิวผนังภายนอกเตาในแต่ละด้าน โดยใช้คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิฟิล์ม (Film temperature) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$T_f = \frac{(T_s + T_o)}{2} \quad (2.30)$$

เมื่อ T_s อุณหภูมิผิวเตา (K)

T_o อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

การหาค่าเรย์ลี (Rayleigh number)

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_\alpha) L^3}{\alpha \nu} \quad (2.31)$$

$$Q_{use} = [m_w C_{p,w} (T_e - T_{i,w})] + m_i H_l \quad (2.32)$$

$$\text{ถ้า } Nu = 0.59 Ra_L^{1/4} ; (Ra < 10^9) \quad (2.33)$$

$$Nu = 0.1 Ra_L^{1/3} ; (10^{10} < Ra < 10^{13}) \quad (2.34)$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{1/16} \right]^{8/27}} \right\} ; \text{Entire rang} \quad (2.35)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

$$h = \frac{(Nu) \times (k)}{L} \quad (2.36)$$

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ความร้อนจากการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) การแผ่รังสีความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เช่น การถ่ายโอนความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก

$$\text{โดย } Q_{sf} = hA_s(T_s - T_\alpha) + \sum \epsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_\alpha^4) \quad (2.37)$$

$$\text{จะได้ว่า } Q_{sf} = hA_s(T_s - T_\alpha) + \sum \epsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_\alpha^4) \quad (2.38)$$

5. ความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนออกทางปล่องควัน (Q_{st})

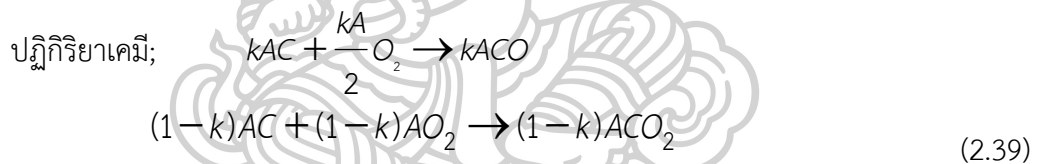
เป็นพลังงานความร้อนที่ออกไปกับไอเสีย โดยจะคำนวณหาองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย และปริมาณองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ได้มาดังนี้

การวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้

กำหนดให้เชื้อเพลิง ใน 1 kmol มีองค์ประกอบดังนี้

C = A kmol, H₂ = B kmol, O₂ = D kmol, N₂ = E kmol และ S = F kmol

Fraction ที่ตรวจวัดได้ในผลิตภัณฑ์ ; O₂ = G และ CO₂ = I



จำนวนโมล O₂ ที่ต้องการใช้ในปฏิกิริยาเคมี = $\frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B + F$

ในเชื้อเพลิง 1 kmol มี O₂ อยู่แล้ว = D

ดังนั้นต้องดูด O₂ จากอากาศ = $\frac{k}{2}A + (1+k)A + \frac{1}{2}B + F - D$

จะได้ว่า จะมี N₂ ติดมากับอากาศ = $3.76 \left[\frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B + F - D \right]$

วิเคราะห์จำนวน kmol ของผลิตภัณฑ์

$$N_2 = E + 3.76 \left[\frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B + F - D \right]$$

$$O_2 = \beta$$

$$CO = kA$$

$$CO_2 = (1-k)A$$

$$H_2O = B$$

$$SO_2 = F$$

จำนวน kmol รวม

$$\begin{aligned} &= \beta + E + 3.76 \frac{kA}{2} + 3.76A - 3.76kA + \frac{3.76}{2}B + 3.76F - 3.76D + kA + A - kA + B + F \\ &= \left[\frac{3.76}{2}k - 3.76k \right] A + [3.76 + 1]A + \left[\frac{3.76}{2} + 1 \right] B - [3.76]D + E + [3.76 + 1]F + \beta \\ &= (-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + 4.76F + \beta \end{aligned}$$

Fraction O_2 ในผลิตภัณฑ์

$$G = \beta / [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]$$

$$\beta = G[(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]$$

$$\beta = \frac{G[(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F]}{1 - G}$$

และ

$$I = (1-k)A / [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]$$

$$I(-1.88kA) + 4.76IA + I[2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta] = (1-k)A$$

$$k = \frac{A - I[4.76A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]}{A[-1.88I + 1]}$$

การคำนวณพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อยคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$Q_{st} = m_{CO_2} \left(\int_{T_\alpha}^{T_s} \bar{C}_{p,CO_2} dT \right) + m_{CO} \left(\int_{T_\alpha}^{T_s} \bar{C}_{p,CO} dT \right) + m_{O_2} \left(\int_{T_\alpha}^{T_s} \bar{C}_{p,O_2} dT \right) +$$

$$m_{N_2} \left(\int_{T_\alpha}^T \bar{C}_{p,N_2} dT \right) + m_{H_2O} \left(\int_{T_\alpha}^T \bar{C}_{p,H_2O} dT \right) \quad (2.42)$$

เมื่อ m_{CO} คือ มวลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (kg)

m_{CO_2} คือ มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kg)

m_{O_2} คือ มวลของก๊าซออกซิเจน (kg)

m_{N_2} คือ มวลของก๊าซไนโตรเจน (kg)

m_{H_2O} คือ มวลของไอน้ำ (kg)

\bar{C}_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ (kJ/kmol) มาจากตาราง A.13 SI Ideal-Gas Properties of Various Substances (SI Unit), Entropies at 0.1-MPa (1-bar) Pressure

Q_{st} คือ ความร้อนจากไอเสียที่ปล่อง (kJ)

6. ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์

ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (Useful heat gain) ในกระบวนการเผาผลาญชีวมวลอัดก้อนและก๊าซปิโตรเลียมเหลวหาได้ปริมาณความร้อนน้ำรับไปหารด้วยปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใส่ไปในระบบ คูณด้วย 100 หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ป

2.7 การวิเคราะห์ต้นทุน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายต้นทุน และค่าใช้จ่ายการดำเนินการ โดยค่าใช้จ่ายต้นทุนประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายที่ดิน อาคาร อุปกรณ์ การติดตั้ง และการซ่อมบำรุง และค่าใช้จ่ายการดำเนินการประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายวัตถุดิบ ค่าใช้จ่ายพลังงานความร้อน ค่าใช้จ่ายไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายบุคลากร [18] การวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตทั้งกระบวนการจนได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยของ Mani et al. (2006) [19] ได้แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกระบวนการ ดังสมการที่ 2.43

$$C_T = C_C + C_{OP} C_T = C_C + C_{OP} \quad (2.43)$$

เมื่อ C_T คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (\$/y)

C_C คือ ค่าใช้จ่ายต้นทุนทั้งหมด (\$/y)

C_{Op} คือ ค่าใช้จ่ายการดำเนินการ (\$/y)

ค่าใช้จ่ายต้นทุนทั้งหมด (C_c) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.44)

$$C_c = eC_{Cq} \quad (2.44)$$

เมื่อ e คือ ปัจจัยกู้คืนต้นทุน
 C_{Cq} คือ ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ (\$)

ปัจจัยกู้คืนต้นทุน (e) หาได้จากสมการที่ 2.41

$$e = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (2.45)$$

เมื่อ i คือ อัตราดอกเบี้ย (ทศนิยม)
 N คือ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ (ปี)

ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ C_{eq} หาได้จากสมการที่ (2.46)

$$C_{eq} = \alpha_{eq} P^{n_{eq}} \quad (2.46)$$

เมื่อ α_{eq} คือ หน่วยค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ (\$)
 n_{eq} คือ Factor มาตรฐานของอุปกรณ์
 P คือ ลักษณะตัวแปรของอุปกรณ์

ในกรณีที่ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์สำหรับความสามารถในการผลิตเฉพาะไม่สามารถหาได้ สมการที่ 2.47 ได้มาจากความสัมพันธ์ค่าใช้จ่ายกับความสามารถในการผลิตที่ใช้ เพื่อหาค่าใช้จ่ายอุปกรณ์

$$C_{eq_1} = C_{eq_2} \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^g \quad (2.47)$$

เมื่อ C_1, C_2 คือ ความสามารถในการผลิตของอุปกรณ์
 g คือ เลขชี้กำลังช่วง 0.4-0.8

สุดท้ายจะได้ค่าใช้จ่าย C_p (\$/kg) ดังสมการที่ 2.48

$$C_p = \frac{C_T}{t_{op} G_p} \quad (2.48)$$

เมื่อ C_T คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (\$/y)
 t_{op} คือ ชั่วโมงการดำเนินการทั้งหมดของโรงงานต่อปี (h/y)
 G_p คือ อัตราการผลิต (kg/h)

ในการวิจัยนี้จะคิดเฉพาะต้นทุนเชื้อเพลิงโดยไม่คิดต้นทุนการสร้างเตา สามารถคำนวณโดยใช้สูตรดังนี้

$$ECU = (\sum C_i) / n \sum (m_i LHV_i) \quad (2.49)$$

2.8 ค่าดัชนีการใช้พลังงาน (Specific energy consumption, SEC)

ค่าดัชนีการใช้พลังงาน หรือ SEC คือ อัตราส่วนของปริมาณการใช้พลังงานต่อปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานมีอยู่มากมายหลายประเภทและแตกต่างกันไปตามกิจกรรมที่มีการใช้พลังงาน SEC มีประโยชน์อยู่หลายอย่างด้วยกันอาทิเช่น

1. ใช้เปรียบเทียบการใช้พลังงานในอดีตกับปัจจุบันของโรงงานนั้น
2. ใช้ในการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานเบื้องต้นของโรงงานประเภทเดียวกันและมีกิจกรรมการใช้พลังงานเหมือนกัน
3. ใช้ประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานเบื้องต้นของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ติดตั้งเพื่อใช้ในการประหยัดพลังงาน
4. ใช้เปรียบเทียบศักยภาพการประหยัดพลังงานเบื้องต้นของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรจากผู้ผลิตหลายๆ รายเพื่อให้ผู้ซื้อนำไปประกอบการตัดสินใจในการจัดซื้อ

เมื่อพิจารณาชนิดของเชื้อเพลิงที่ผู้ประกอบการใช้พบว่ามียุ่หลากหลายชนิดหน่วยที่ใช้ในการเก็บข้อมูลก็แตกต่างกันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้จึงเปลี่ยนหน่วยของพลังงานจากเชื้อเพลิงให้มีหน่วยเดียวกันคือ “เมกกะจูล” โดยใช้ค่าความจุความร้อน (Heating value, kJ/kg, kJ/liter, etc.) คูณกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้โดยค่าความจุความร้อนที่ได้ อาจจะเป็นค่าของผู้ประกอบการเองที่ได้มาจากผู้ผลิตหรืออาจจะใช้ค่าดังแสดงใน ตารางที่ 2.3 ก็ได้ (จากฐานข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) และจากผลการศึกษาของโครงการพบว่าหน่วยของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการหาค่าดัชนีและเกณฑ์มาตรฐานในการเปรียบเทียบควรใช้หน่วยเป็น “น้ำหนัก (กิโลกรัมตัน ฯลฯ)” เพื่อให้การทำ Benchmarking ระหว่างผู้ประกอบการสามารถเปรียบเทียบกันได้

การคำนวณค่าดัชนีต้นทุนการใช้พลังงานเป็นการประยุกต์ใช้แนวทางการหาค่าดัชนีการใช้พลังงานในเชิงพาณิชย์เพื่อให้ง่ายแก่การทำความเข้าใจของผู้ประกอบการซึ่งจะให้ความสำคัญกับต้นทุนการผลิตเป็นหลักและเพื่อให้สะท้อนผลลัพธ์ในแง่ของการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่มีราคาถูก

$$\text{ค่าดัชนีต้นทุนด้านพลังงาน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานรวม (1)}}{\text{ปริมาณการผลิต (2)}} \quad (2.50)$$

โดยที่

1. ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานรวม

คือค่าใช้จ่ายในการซื้อไฟฟ้าและเชื้อเพลิงรวมถึงสิ่งใช้ทดแทนพลังงานอื่นๆ (เช่นไอน้ำ) รวมทั้งหมดของโรงงานมีหน่วยเป็นบาท

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานรวม(บาท) = ผลรวมของปริมาณพลังงานที่ใช้แต่ละชนิด x ราคาต่อหน่วย (2.51)

2. ปริมาณผลผลิต (Production)

คือ ปริมาณการผลิตรวมผลการศึกษาพบว่าสมควรจะใช้หน่วยน้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์ในการเปรียบเทียบดังนั้น

ปริมาณผลผลิต (kg) = ปริมาณผลผลิต (หน่วย) x น้ำหนักต่อหน่วย (kg/หน่วย) (2.52)

ข้อดีของการคิดคำนวณในลักษณะนี้คือผู้ประกอบการสามารถเข้าใจได้ง่าย และสามารถนำกลับไปคิดคำนวณเปรียบเทียบกับต้นทุนการใช้พลังงานรวมของตนได้ในทันที รวมถึงแสดงผลกระทบในแง่ของการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่มีราคาอยู่ด้วยคือ เน้นในการลดต้นทุนพลังงานเป็นหลัก แต่ข้อเสียคือดัชนีนี้จะเปลี่ยนแปลงตามราคาพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้มีการเคลื่อนไหวเร็วมาก ค่า SEC และ Benchmark ที่วิเคราะห์ได้จะนำมาใช้งานเปรียบเทียบได้ ณ จุดเวลานั้นเท่านั้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยทางความร้อนนั้นมักจะเน้นในเรื่องผลของคุณสมบัติและชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวลต่อประสิทธิภาพของระบบโดย Z.A. Zainal et al (2000) [20] ได้เสนอแบบจำลองสมดุลทางเคมี (Equilibrium modeling) เพื่อใช้ทำนายองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซในระบบก๊าซซีพีเอ็นเออร์ พบว่าถ้าค่าความชื้นเริ่มต้นในชีวมวลมีมากจะทำให้อุณหภูมิของก๊าซซีพีเคชันต่ำลงซึ่งทำให้ผลได้ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง และทำให้ค่าความร้อนของก๊าซสังเคราะห์ลดลงด้วย ถึงแม้ปริมาณของไฮโดรเจนและมีเทนจะเพิ่มขึ้น โดย Z.A. Zainal ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 750-900°C การทดลองของ P.C. Roy et al (2010) [21] ใช้มูลวัวผสมกับขี้เลื่อยเป็นเชื้อเพลิง พบว่าถ้าอัตราส่วนผสมของมูลวัวมากประสิทธิภาพผลิตก๊าซจะต่ำเนื่องจากมูลวัวมีค่าความร้อนต่ำ อัตราส่วนผสมของมูลวัวที่เหมาะสมอยู่ที่ 40-50% โดยมวล S. Marco et al (2012) [22] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในระดับจำลอง (Pilot scale) ของเชื้อเพลิงขี้เลื่อย (Sawdust) และเมล็ดทานตะวัน (Sunflower seed) อัดแท่งตะเกียบ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ก๊าซซีพีไฟร์แบบไหลลงขนาด 200 กิโลวัตต์ พบว่าเกิดแรงดันตกคร่อมกองเชื้อเพลิงสูงเนื่องจากเกิดการแตกเป็นชิ้นเล็กๆ ของแท่งเชื้อเพลิง ขวางทางการไหลของก๊าซทำให้ต้องเอาถ้ำออกบ่อยเป็นผลให้ก๊าซเกิดไม่สม่ำเสมอ โดยก๊าซที่ได้ประกอบด้วย H₂ 17.2%, N₂ 46.02%, CH₄ 2.5%, CO 21.2%, CO₂ 12.6% และ C₂H₄ 0.4% ค่าการผลิตก๊าซจำเพาะ (SGR) 2.2-2.4 Nm³/kg ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ (CGE) 67.7-70.0%

Lars Kåre Grimsby et al. [23] ได้ศึกษาการใช้เปลือกสับุดำมาทำเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาประกอบอาหารแบบเตาขี้เลื่อย (Sawdust Stove) ซึ่งมีลักษณะทรงกระบอกข้างในบรรจุเชื้อเพลิง

โดยมีช่องว่างตรงกลางทรงกระบอกสำหรับเป็นพื้นที่ผิวการเผาไหม้ และรูเจาะด้านข้างสำหรับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จากการทดสอบการต้มน้ำ (Water Boiling Test) และการนำไปใช้งานจริงพบว่าเตาให้กำลังสูงสุด 3.1 กิโลวัตต์ ภายในเวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมงเพราะว่ามีการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับการประกอบอาหารที่ต้องใช้กำลังไฟสูงและต้องใช้เวลาในการปรุง แต่จากการวัด คาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานของการอนามัยโลกส่วน อนุภาคพีเอ็ม 10 สูงกว่าค่ากำหนดขององค์การอนามัยโลก

Simone Pietro Parmigiani et al (2014) [24] ได้ทำการพัฒนาเตาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงมีโครงสร้างภายนอกเป็นดินเหนียวมีปล่องเตาเพื่อช่วยดูดควันและถ่ายมลพิษออกจากบริเวณที่ติดเตาและเป็นตัวช่วยดูดอากาศเผาไหม้เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้พัดลมไฟฟ้า แกลบบรรจุอยู่ในตะกร้าทรงกระบอกทำด้วยตาข่ายโลหะ มีช่องว่างตรงกลาง และบรรจุถ่านไว้สำหรับใช้ตอนเริ่มติดเตา ด้านบนปิดด้วยแผ่นโลหะเพื่อบังคับทิศทางไหลของก๊าซ ตะกร้าที่บรรจุเชื้อเพลิงเรียบริ้ว จะนำไปใส่ไว้ในโครงสร้างเตาที่เป็นดินเหนียวอีกทีหนึ่งจากการทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) ได้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อน 18% และจากวิธีการประกอบอาหาร (Controlled Cooking Test) ค่าการใช้ความร้อนเฉพาะ (Specific Consumption) เท่ากับ 42 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมอาหาร เนื่องจากมีการใช้ปล่องจึงทำให้ปริมาณมลพิษได้ตามมาตรฐานของการควบคุมมลพิษ ของการอนามัยโลก (WHO)



บทที่ 3

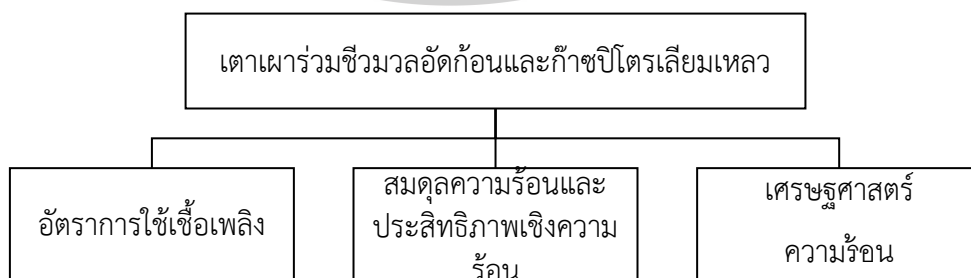
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “สมรรถนะทางความร้อนของเตาชนิดเผาพร้อมระหว่างชีวมวลอัดก้อนและก๊าซปิโตรเลียมเหลว” มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการใช้ชีวมวลแบบอัดก้อนและก๊าซปิโตรเลียมเหลวในเตาเผาพร้อม และศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ความร้อน รวมทั้งการทำสมดุลความร้อนและประสิทธิภาพทางความร้อน โดยมีรายละเอียดของการดำเนินการวิจัยดังนี้

- 3.1 แผนการวิจัย
- 3.2 แผนการทดลอง
- 3.3 วิธีทดลอง
- 3.4 วัตถุประสงค์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย
- 3.5 ระยะเวลาการทดลอง
- 3.6 สถานที่ทำการทดลอง
- 3.7 งบประมาณการวิจัย
- 3.8 การวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

สำหรับแผนการวิจัยของงานวิจัยนี้ จะทำการเผาทดสอบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนโดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงร่วม ในเตาเผาพร้อมที่จัดสร้างขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ความร้อน การศึกษาสมดุลความร้อนรวมถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อน แผนการวิจัยโดยสรุปแสดงด้วยรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการวิจัย

3.2 แผนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะใช้เตาเผาสำหรับการทดสอบทั้งหมด 3 เตา คือเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 ที่ความสูง 400 มิลลิเมตรเท่ากันทั้ง 3 เตา ซิวมวลที่ใช้ทำทดสอบมีชนิดเดียวคือซีลี้อยขนาด 1350 ± 60 ไมโครเมตร โดยแต่ละเตาจะใช้อัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3 ค่าคือ 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที รวมเป็น 9 การทดลอง ซึ่งในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมเป็นการเผาทั้งหมด 27 ครั้ง ผลการทดลองต่างๆ จากการเผา นำไปใช้คำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิง สมดุลความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อน รวมถึงเศรษฐศาสตร์ความร้อนต่อไป แผนการทดลองแสดงได้ตาม รูปที่ 3.2



3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเชื้อเพลิง

การเตรียมเชื้อเพลิงเริ่มจากนำซีลี้อยที่ใช้ในการทดสอบไปตากแห้งเพื่อไล่ความชื้น โดยใช้เวลาประมาณ 2 วัน ซีลี้อยที่ตากแห้งเรียบร้อยแล้วนำมาใส่ในถุงดำมัดปากให้แน่นเก็บไว้ในที่ร่มเพื่อเตรียมไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบต่อไป ส่วนก๊าซปิโตรเลียมเหลวใช้จากก๊าซบรรจุถังสำหรับใช้ในบ้านเรือนทั่วไป



รูปที่ 3.3 เตาชีวมวล

3.3.2 ขั้นตอนการเผา

ขั้นตอนการเผาจะเริ่มจากขั้นตอนการบรรจุเชื้อเพลิงในเตาเผาโดยการนำซีลี้อยที่เตรียมไว้มาใส่ในเตาเผาพร้อม ต้องใส่ให้เนื้อชีวมวลมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งเตา แล้วอัดให้แน่นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค โดยใช้แรงอัด 300 กิโลปาสคาล เมื่อซีลี้อยยุบตัวให้เต็มลงไปใหม่และอัดให้แน่น ทำซ้ำขั้นตอนนี้ประมาณ 2-3 ครั้ง หรือจนกว่าชีวมวลจะเต็มกระบอก จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชีวมวลที่ใส่ทั้งหมด บันทึกผล แล้วโรยทับหน้าชีวมวลด้วยทราย เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารโวลาทิล เมื่อทำการบรรจุชีวมวลเรียบร้อยแล้วทำการปิดฝาเตาเผา นำเตาเผาที่บรรจุเชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้วไปวางบนแท่นทดสอบเตา โดยให้รูตรงกันเตาเผาตรงกับหัวเผาก๊าซที่ติดอยู่กับแท่นทดสอบ ล็อคตัวเตาเผาให้แน่นกับแท่นทดสอบ แล้วทำการจุดหัวเผาปิโตรเลียมเหลว รอจนเปลวไฟของเตาคงที่ให้ทำการต้มน้ำ ทำการจดบันทึกค่าลงในแบบฟอร์มบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3.4 การจัดเตรียมเตาสำหรับการทดลอง

3.3.3 การวัดการสูญเสียความร้อน ทำโดยการวัดค่าต่างๆ ดังนี้

3.3.3.1 การสูญเสียที่ผิวเตาทำโดยการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของผิวเตา แบ่งเป็นการวัดที่ด้านข้าง 9 จุด ด้านบนและด้านล่างด้านละ 1 จุด เพื่อไปคำนวณการสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนต่อไป

3.3.3.2 การสูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด วัดจากปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลือจากเผาไหม้ซึ่งได้จากค่าน้ำหนักชีวมวลทั้งหมดที่บรรจุในเตาเผาลบด้วยน้ำหนักชีวมวลที่ลดลงจากการเผาไหม้

3.3.3.3 การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิงได้จากการวิเคราะห์ค่าความชื้นของชีวมวล

3.3.3.4 ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ทำโดยใช้หม้อต้มน้ำเบอร์ 40 บรรจุน้ำ 10 เป็นตัวรับความร้อนจากเตา

3.3.3.5 ค่าการสูญเสียอื่นที่ไม่ได้ทำการตรวจวัดได้จากการนำค่าการสูญเสียต่างๆ ข้างต้นลบจากปริมาณความร้อนทั้งหมดของเชื้อเพลิง

3.3.4 การดำเนินการทดลองและควบคุมเตา

ลักษณะการเผาไหม้ของเตาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงเริ่มจุดเตา ช่วงการเกิดเปลวไฟ และช่วงการเผาไหม้ถ่าน ช่วงแรกจะเป็นการเผาไหม้เฉพาะผิวหน้าของเชื้อเพลิงประกอบกับเตายังมีอุณหภูมิต่ำทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และมีเขม่าควัน เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของชั้นเชื้อเพลิงชั้นถัดไปสารโวลาทิลจะไหลออกมาผ่านชั้นถ่านคุดแดงของเชื้อเพลิงชั้นนอก สารระเหย (Volatile Matter, VM) บางส่วนเกิดปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชัน ก๊าซสังเคราะห์และสารโวลาทิลที่ได้จะถูกเผาไหม้เกิดเปลวไฟ ให้นำหม้อต้มน้ำมาทำการต้มน้ำ โดยใช้น้ำ 10 กิโลกรัม บรรจุในหม้อต้มน้ำเบอร์ 40 (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร) ใช้เวลาต้ม 9 นาทีบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 3 นาที โดยการต้มน้ำทำเป็นช่วงตลอดการทดลอง และควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 85 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ เมื่อสารระเหยในชีวมวลระเหยออกมาจนหมดจะเหลือ

ชั้นถ่านคุดแต่งการเผาไหม้เปลวไฟจะค่อยๆ หมดลงเหลือเป็นการเผาไหม้ของฟิสิกส์คาร์บอน (Fixed Carbon) ความร้อนของเตาจะค่อยๆ ลดลง รอจนเผาไหม้หมด ที่เหลือเป็นถ่านและชีวมวลที่ไม่เผาไหม้ โดยในระหว่างการทดลองให้การบันทึกค่าต่างๆ ลงในแบบฟอร์มการบันทึกผลการทดลองตลอดเวลา ส่วนการบันทึกอุณหภูมิผิวเตา ใช้ดาตาลีคเกอร์



รูปที่ 3.5 ดาตาลีคเกอร์ midi LOGGER รุ่น GL 820

3.4 วัสดุดิบและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

วัสดุดิบและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

3.4.1 ในการทดลองนี้จะใช้ชี้เลี้ยงไม้เบญจพรรณขนาด 1380 ± 65 ไมครอน มีค่าความชื้น 7.5-10% วิเคราะห์ตามวิธี ASTM E871 - 82 ค่าความร้อนสูง 1600 กิโลจูลต่อกิโลกรัม วิธีวิเคราะห์โดยนำเชื้อเพลิงไปทดสอบด้วยเครื่องบอร์มคาลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) โดยทำการวิเคราะห์ที่ห้องทดลองของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์



รูปที่ 3.6 ชี้เลี้ยงไม้เบญจพรรณ ขนาด 1380 ± 65 ไมครอน

3.4.2 เตาเผา เป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้า ด้านล่างมีช่องอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตรจำนวน 1 ช่องและที่ก้นของเตาเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตรไว้สำหรับจุดหัวเผาแก๊สปิโตรเลียมเหลว ฝาปิดทำด้วยเหล็กกล้า หุ้มด้วยฉนวนเซรามิคไฟเบอร์หนา 50 มิลลิเมตร มี 3 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 สูง 400 มิลลิเมตร

แท่นทดสอบเตาเป็นโครงสร้างเหล็กมี 2 ชั้น สามารถถอดแยกออกจากกันได้ มีหัวเผาก๊าซติดอยู่ด้านล่าง แท่นทดสอบนี้วางบนเครื่องชั่งอีกครั้งหนึ่ง

3.4.3 เครื่องชั่งน้ำหนักใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอลรุ่นแบบวางพื้น ยี่ห้อ AND รุ่น EM-150KAL พิกัดน้ำหนัก 0-150 กิโลกรัม ค่าความละเอียด 10 กรัม

3.4.4 การวัดอุณหภูมิใช้สายเทอร์โมคัปเปิลแบบเค (Type K/J (-100-1300° C) บันทึกผลและอ่านค่าด้วยดาตาล็อกเกอร์

3.5 ระยะเวลาการวิจัย

งานวิจัยเริ่มจากเดือนมิถุนายน 2559 โดยขั้นแรกจะเป็นการรวบรวมข้อมูลเพื่อหาเงื่อนไขและหลักการเบื้องต้น เมื่อได้เงื่อนไขแล้วจึงเริ่มทำการทดลองและเก็บผล จากผลการทดลองที่ได้นำไปวิเคราะห์หาค่าและทำสมดุลความร้อน รวมทั้งหาประสิทธิภาพทางความร้อน สรุปผลทดลอง และการเขียนรายงานการวิจัย โดยงานทั้งหมดกำหนดให้แล้วเสร็จในเดือนธันวาคม 2559 ซึ่งระยะเวลาการดำเนินการวิจัยสามารถเขียนเป็นตารางสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาดำเนินงาน

รายการการดำเนินการวิจัย	ระยะเวลา
1. รวบรวมข้อมูลของเชื้อเพลิงซีลี้อยและการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเงื่อนไขและหลักการเบื้องต้นของเตาเผาพร้อม	มิ.ย. 2559
2. เริ่มทำการทดลองและเก็บผล	ต.ค. 2559
3. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	ก.ย. 2559
4. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย	พ.ย. 2559
5. เขียนรายงานการวิจัย	ธ.ค. 2559
รวมระยะเวลาการวิจัย 8 เดือน	

3.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

3.7 งบประมาณการวิจัย

สำหรับงบประมาณที่ใช้เพื่อดำเนินการศึกษาและวิจัยในงานวิจัยนี้เป็นจำนวนเงินโดยประมาณ 51,000 บาท (ห้าหมื่นหนึ่งพันบาทถ้วน) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.7.1 ซีลี้อย จำนวนเงิน 1,000 บาท

3.7.2 ค่าการดำเนินการ จำนวนเงิน 50,000 บาท

3.8 การวิเคราะห์ผลการทดลองและการสรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทดลองทำโดยวิธีต่อไปนี้

3.8.1 อัตราการใช้เชื้อเพลิง

อัตราการใช้เชื้อเพลิงคำนวณ จากการนำน้ำหนักของซีลี้อยู่ก่อนการทำการเผาด้วย น้ำหนักชีวมวลที่เหลือจากการเผา หาดด้วยเวลาที่ใช้ในการเผา หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามสูตรข้างล่างนี้

$$\dot{m} = \frac{(m_i - m_o)}{(t_1 - t_2)} \quad (3.1)$$

เมื่อ \dot{m} = อัตราการใช้เชื้อเพลิง (กก./ชม)

m_i = น้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ (กก.)

m_o = น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ (กก.)

3.8.2 กำลังของเตาคำนวณจากอัตราความร้อนที่รับโดยการต้มน้ำด้วยหม้อต้มน้ำเบอร์ 40 ใส่ น้ำ 10 ลิตร โดยคำนวณในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อตัดผลจากการ ระเหยของน้ำ

$$P = \frac{m_{water} C_{p,water} (T_1 - T_2)}{(t_1 - t_2)} \quad (3.2)$$

เมื่อ P = กำลังของเตา (วัตต์)

m_{water} = มวลของน้ำ (กก.)

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (กก.จูล/กก.)

T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้มน้ำ (องศาเซลเซียส)

T_2 = อุณหภูมิหยุดต้มน้ำ (50 องศาเซลเซียส)

t_1 = เวลาเริ่มต้มน้ำ

t_2 = เวลาหยุดต้มน้ำ

3.8.3 หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวล

ความร้อนของซีลี้อยู่ ($Q_{sawdust}$)

$$Q_{sawdust} = HHV_{sawdust} \times m_{sawdust} \quad (3.3)$$

$HHV_{sawdust}$ = ค่าความร้อนสูงของซีลี้อยู่ (10.87 MJ/kg)

$m_{sawdust}$ = มวลของซีลี้อยู่ (kg)

$$Q_{LPG} = HHV_{LPG} \times m_{LPG} \quad (3.4)$$

HHV_{LPG} = ค่าความร้อนสูงของ LPG (49.296 MJ/kg)

m_{LPG} = มวลของ LPG (kg)

พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์หรือความร้อนที่วัตถุดิบได้รับ (Useful heat gain)

$$Q_{useful} = (m_c c_{p,water} (T_1 - T_2)) \quad (3.5)$$

เมื่อ m_c = มวลของน้ำ (กิโลกรัม)

$c_{p,water}$ = ความจุความร้อนของน้ำ (4.187 kJ/kg)

พลังงานที่ใช้ประโยชน์ คือความร้อนที่น้ำได้รับ (กิโลจูล)

พลังงานที่ให้กับเตา คือ พลังงานจากชีวมวลกับพลังงานจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว

3.8.4 การสูญเสียความร้อนจากผิวเตา

ทำโดยการวัดพื้นที่ผิวเตาทั้งหมดและทำการตรวจวัดอุณหภูมิผิวเตา ทั้งหมด 8 จุดด้วยเครื่องดาตาล็อกเกอร์ (Data Logger) นำค่าที่วัดได้ไปคำนวณตามสูตรข้างล่างนี้

$$Q_{surface} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (3.6)$$

$$\text{โดย } Q_{conv} = \sum h A_s (T_s - T_0) \quad (3.7)$$

เมื่อ h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (จูล/ตารางเมตร องศาเซลเซียส)

A_s = พื้นที่ผิวด้านนอกของเตา (ตารางเมตร)

T_s = อุณหภูมิของผิวเตา (องศาเซลเซียส)

T_0 = อุณหภูมิบรรยากาศ (องศาเซลเซียส)

$$\text{โดย } Q_{rad} = \sum \epsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_0^4)$$

(3.8)

เมื่อ ϵ = ค่าการสะท้อนรังสี (%)

σ = ค่าคงที่ของสเตฟานโบลท์มานน์เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

3.8.5 การสูญเสียเนื่องจากชีวมวลเผาไหม้ไม่หมด

มีวิธีคิดค่าการสูญเสียความร้อนดังนี้

$$\text{เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด} = \text{นน.ตอนเริ่มต้น} - \text{นน.ที่เหลือหลังการเผาไหม้} \quad (3.9)$$

$$m_{Ash} = m_{sawdust} - (\%Ash \times m_{sawdust}) \quad (3.10)$$

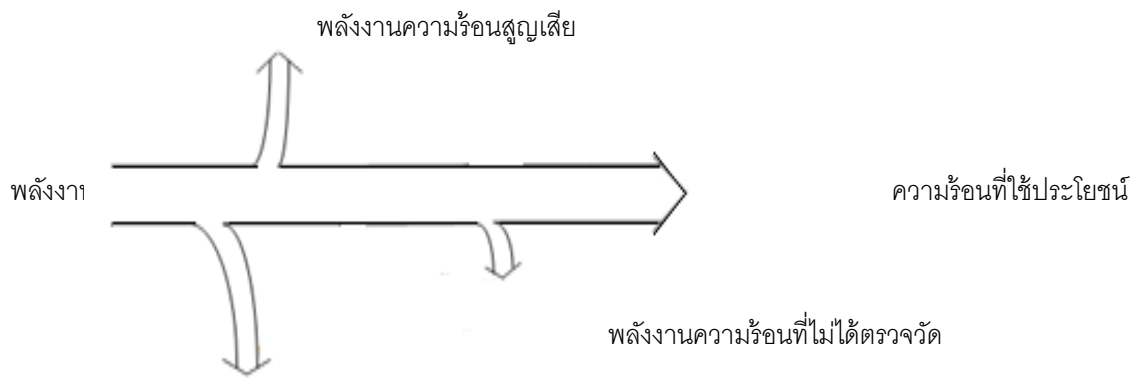
$$Q_{unburn} = m_{sawdust,unburn} \times HHV_{sawdust} \quad (3.11)$$

3.8.6 การสูญเสียที่ไม่ได้ตรวจวัด

ได้จากปริมาณความร้อนของชีวมวลลบกับปริมาณความร้อนจาก ปิโตรเลียมเหลวลบด้วยความร้อนที่ใช้ประโยชน์ลบด้วยความร้อนสูญเสียตามสูตรข้างล่างนี้

$$Q_{other} = Q_{sawdust} + Q_{LPG} - Q_{surface} - Q_{unburn} - Q_{useful} \quad (3.12)$$

3.8.7 สมดุลความร้อน สามารถแสดงได้ตามรูปข้างล่างนี้



พลังงานความร้อนที่พื้นผิว

รูปที่ 3. 7 สมดุลพลังงานของระบบ



บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

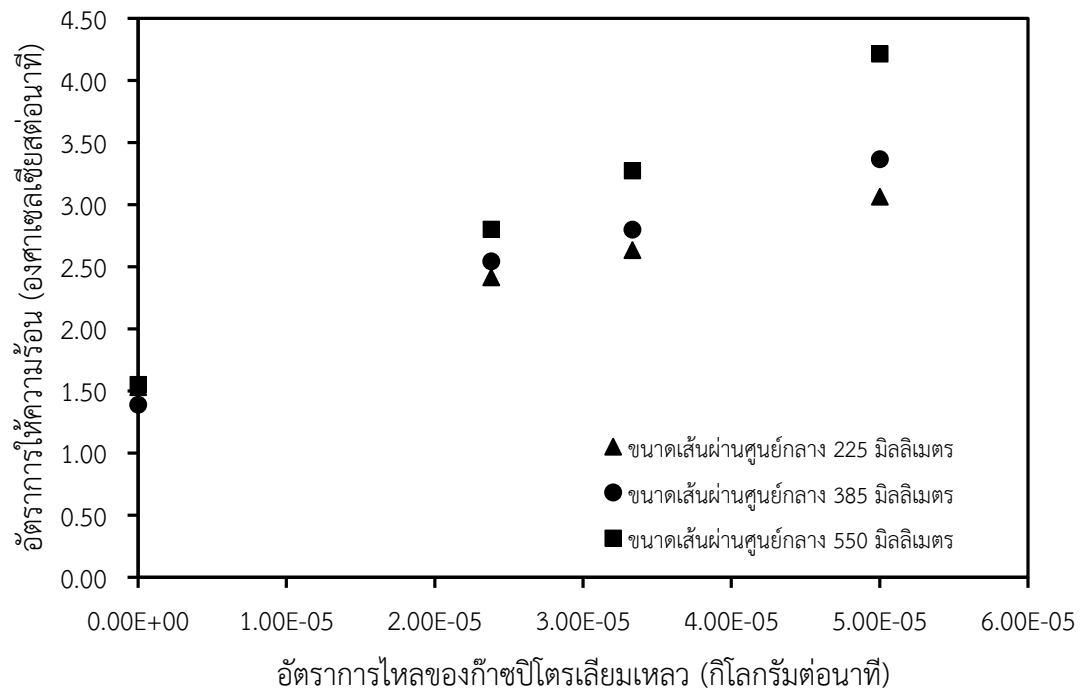
จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและเศรษฐศาสตร์ความร้อนของเตาเผา ร่วมชีวมวลอัดและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในเตาโลหะทรงกระบอก 3 ขนาด คือขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร ความสูง 400 มิลลิเมตร เท่ากันทั้งสามเตา เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร บรรจุก๊าซเชื้อเพลิงอัด 3.5 กิโลกรัม เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร บรรจุก๊าซเชื้อเพลิงอัดจำนวน 11.0 กิโลกรัม และเตาขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร บรรจุก๊าซเชื้อเพลิงอัดจำนวน 24.0 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยทำการศึกษาที่ อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

4.1 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) และกำลังของเตา

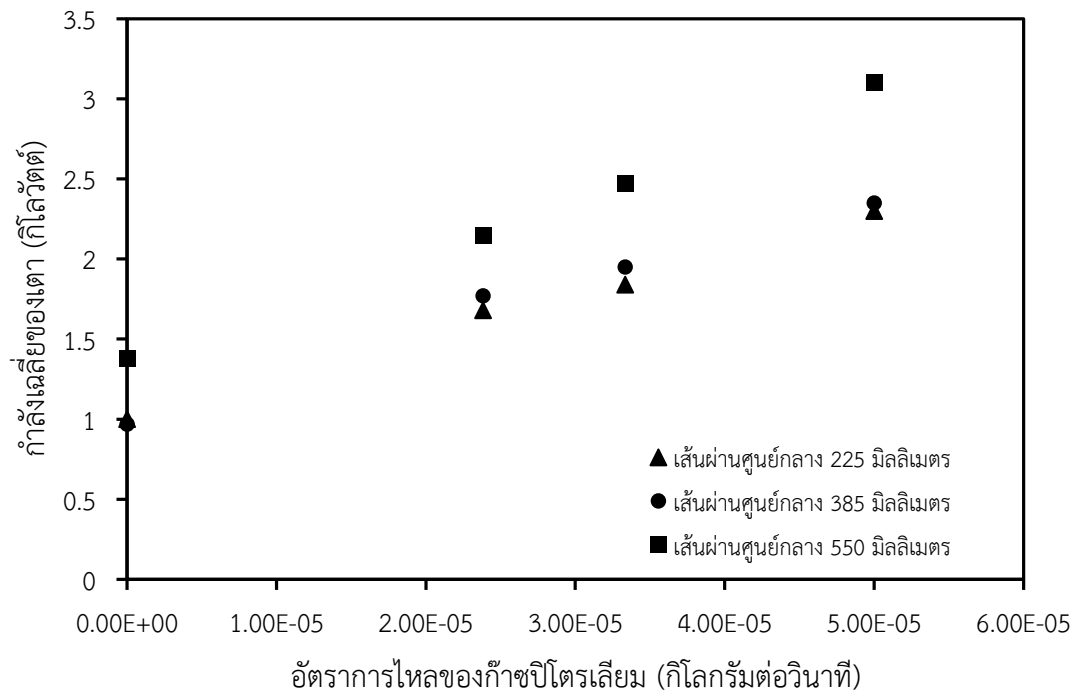
รูปที่ 4.1 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้ความร้อน กับอัตราการไหลของ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเท่ากับ 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร ตามลำดับ แกนตั้งแสดงอัตราการให้ความร้อน มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียสต่อวินาที แกนนอนแสดงอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อ วินาที เมื่อพิจารณาอัตราการให้ความร้อน กับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ 0.00 กิโลกรัม ต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าอัตรา การให้ความร้อนของกระบวนการมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง มีค่าเท่ากับ 1.53 1.39 และ 1.55 องศาเซลเซียสต่อวินาทีตามลำดับ ที่ 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าอัตราการให้ความร้อนของ กระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงในช่วงหลัง มีค่าเท่ากับ 2.42 2.55 และ 2.80 องศาเซลเซียสต่อวินาทีตามลำดับ ที่ 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการมี แนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 2.63 2.80 และ 3.27 องศาเซลเซียสต่อวินาทีตามลำดับ และที่ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก และเพิ่มขึ้น ในช่วงหลัง มีค่าเท่ากับ 3.07 3.37 และ 4.22 องศาเซลเซียสต่อวินาทีตามลำดับ และเมื่อพิจารณา จากขนาดเตา 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5}

และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีพบว่ากำลังของเตามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 1.53 2.42 2.63 และ 3.07 องศาเซลเซียสต่ออนาที ตามลำดับ ขนาดเตา 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที มีค่าเป็น 1.39 2.55 2.80 และ 3.37 องศาเซลเซียสต่ออนาที ตามลำดับ และ ขนาดเตา 550 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที มีค่าเป็น 1.55 2.80 3.27 และ 4.22 กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ

จะพบว่าเมื่อติดเตาโดยไม่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงร่วม อัตราการให้ความร้อนของเตาขนาด 225 385 และ 550 มิลลิเมตรคือ 1.53 1.39 และ 1.55 องศาเซลเซียสต่ออนาทีตามลำดับ เมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงร่วมอัตราการให้ความร้อนของเตาจะเพิ่มขึ้นลักษณะเป็นเชิงเส้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว ที่เพิ่มขึ้นจาก 2.38×10^{-5} เป็น 5×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที สำหรับเตาขนาด 225 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจาก 2.42 เป็น 3.07 องศาเซลเซียสต่ออนาที เตาขนาด 385 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้นจาก 2.56 เป็น 3.37 องศาเซลเซียสต่ออนาที และเตาขนาด 550 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้นจาก 2.80 เป็น 4.22 องศาเซลเซียสต่ออนาที เพราะว่าการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะเพิ่มอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาให้สูงขึ้น ซึ่งทำให้อัตราการเกิดก๊าซไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจากอัตราการสลายตัวของซีเลียมอัดที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นภายในเตาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการเผาไหม้ มวลของเชื้อเพลิงชีวมวล และอัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ดังนั้นการเพิ่มอัตราไหลของก๊าซจึงเป็นการเพิ่มอัตราการเผาไหม้ที่เกิดจากมวลของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังเฉลี่ยของเตาเพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่ากำลังเตาขนาด 225 และ 385 มิลลิเมตรจะไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งเป็นเพราะว่าช่องอากาศเริ่มต้นมีค่าเท่ากันคือ 63.5 มิลลิเมตร แต่เมื่อเตาขนาด 550 มิลลิเมตรซึ่งมีรัศมีแตกต่างกันมากทำให้ช่องว่างอากาศมีขนาดโต ซึ่งเพิ่มพื้นที่การเผาไหม้ทำให้เตามีกำลังเพิ่มมากขึ้นมากกว่าเตาขนาด 225 และ 385 มิลลิเมตร นอกจากนั้นเวลาที่ใช้ในการเผา ก็ยังเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อพื้นที่การเผาไหม้ โดยพื้นที่การเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการเผา เกิดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวและกำลังเฉลี่ยของเตาดังรูปที่ 4.2 เมื่อไม่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวกำลังเฉลี่ยของเตาอยู่ที่ 1.00-1.38 กิโลวัตต์ ที่อัตราการไหล 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที กำลังเฉลี่ยของเตาอยู่ในช่วง 2.30 ถึง 3.10 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้ความร้อนเตา และอัตราการไหลก๊าซหุงต้ม



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเตา และอัตราไหลก๊าซหุงต้ม

การเพิ่มอัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นที่ทุกๆ การแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา คือ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นจาก 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 1.53 2.42 2.63 และ 3.06 องศาเซลเซียสต่อนาทีตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 1.39 2.55 2.80 และ 3.37 องศาเซลเซียสต่อนาทีตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 1.55 2.80 3.27 และ 4.22 องศาเซลเซียสต่อนาทีตามลำดับ

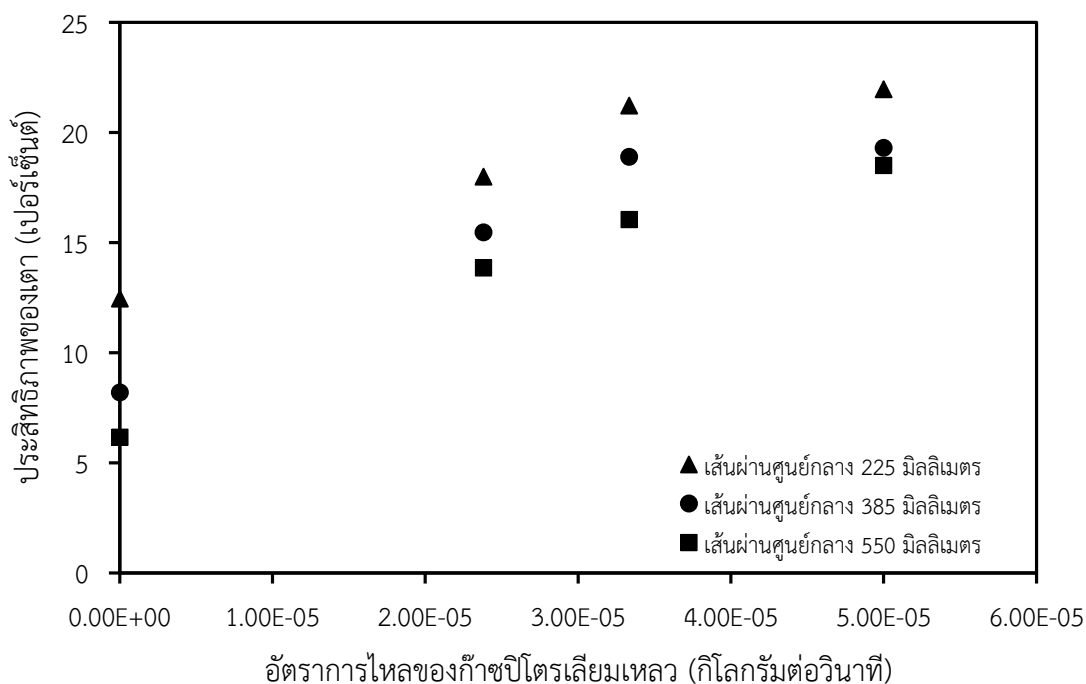
นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังของเตาเพิ่มขึ้นที่ทุกๆ การแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาคือ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นจาก 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ส่งผลให้กำลังของเตาเพิ่มขึ้นจาก 1.00 1.68 1.84 และ 2.30 กิโลวัตต์ตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ส่งผลให้กำลังของเตาเพิ่มขึ้นจาก 0.97 1.77 1.95 และ 2.35 กิโลวัตต์ตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ส่งผลให้กำลังของเตาเพิ่มขึ้นจาก 1.38 2.15 2.47 และ 3.10 กิโลวัตต์ตามลำดับ

4.2 ประสิทธิภาพของเตา

รูปที่ 4.3 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเตา กับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเท่ากับ 225 385 และ 550 มิลลิเมตร ตามลำดับ แกนตั้งแสดงประสิทธิภาพของเตามีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ แกนนอนแสดงอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวินาที เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเตากับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ 0.00 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 และ 385 มิลลิเมตร มีค่าใกล้เคียงกันคือ 12.45 และ 8.19 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตรมีค่าลดลง คือ 6.15 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราไหล 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตร พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการมีแนวโน้มลดลง มีค่าเท่ากับ 18.00 15.47 และ 13.85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่ 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตร พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงในช่วงหลัง มีค่าเท่ากับ 21.23 18.90 และ 16.05 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตร พบว่าอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงในช่วงหลัง มีค่าเท่ากับ 21.96 19.30 และ 18.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากขนาดเตา

225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10⁻⁵ 3.33×10⁻⁵ และ 5.00×10⁻⁵ กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 12.45 18.00 21.23 และ 21.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขนาดเตา 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10⁻⁵ 3.33×10⁻⁵ และ 5.00×10⁻⁵ กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 8.19 15.47 18.90 และ 19.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเตาขนาด 550 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10⁻⁵ 3.33×10⁻⁵ และ 5.00×10⁻⁵ กิโลกรัมต่อวินาที ประสิทธิภาพของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 6.15 13.85 16.05 และ 18.51 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเตาและอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว เมื่ออัตราไหลก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 0.00 ถึง 5.00 × 10⁻⁵ กิโลกรัมต่อวินาที ประสิทธิภาพของเตา 225 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจาก 12.45 % เป็น 21.96 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเตา 385 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 8.19 เปอร์เซ็นต์ เป็น 19.30 เปอร์เซ็นต์ และเตา 550 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 6.15 เป็น 18.51 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกรณีที่ไม่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงร่วมพบว่า มีชีวมวลเหลือจากการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก การใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงร่วมมีส่วนสำคัญในการเกิดก๊าซไพโรไลซิสของชี้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวการเผาไหม้จะไม่เสถียรเป็นผลให้อุณหภูมิภายในเตาต่ำ ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังชั้นของชี้อยู่ชั้นถัดไปจึงมีน้อย ซึ่งความร้อนนี้ไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสในชีวมวล จึงไม่มีก๊าซไพโรไลซิสเกิดขึ้น การเผาไหม้จึงเป็นการเผาไหม้ที่ชี้อยู่โดยตรงมีอุณหภูมิต่ำจึงทำให้เกิดควันเป็นจำนวนมาก ความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซหุงต้มจะช่วยรักษาระดับอุณหภูมิของการเผาไหม้ให้สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสในชี้อยู่และเกิดก๊าซไพโรไลซิสขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวต่ำความร้อนมีไม่เพียงพอที่จะยกอุณหภูมิห้องเผาไหม้ถึงอุณหภูมิที่ทำให้ชี้อยู่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ปริมาณของชี้อยู่ที่ไม่เผาไหม้ก็จะเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเตาลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้มีปริมาณก๊าซหุงต้มที่เพียงพอที่จะรักษาอุณหภูมิของเตาและเกิดก๊าซไพโรไลซิส พบว่าประสิทธิภาพของเตา 385 มิลลิเมตรสูงกว่าเตา 225 มิลลิเมตร ยกเว้นที่ อัตราการไหลก๊าซหุงต้ม ที่ 2.38×10⁻⁵ ซึ่งอาจเกิดปริมาณก๊าซหุงต้มน้อยทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ไม่พอที่จะทำให้เกิด ปฏิกิริยาไพโรไลซิสในชี้อยู่ได้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเตากับอัตราไหลของก๊าซหุงต้ม

อัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพเตาเพิ่มขึ้นที่ทุกๆ การแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา คือ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นจาก 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 12.45 18.00 21.23 และ 21.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตาเพิ่มขึ้นจาก 8.19 15.47 18.90 และ 19.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพเตาเพิ่มขึ้นดังนี้ 6.15 13.85 16.05 และ 18.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

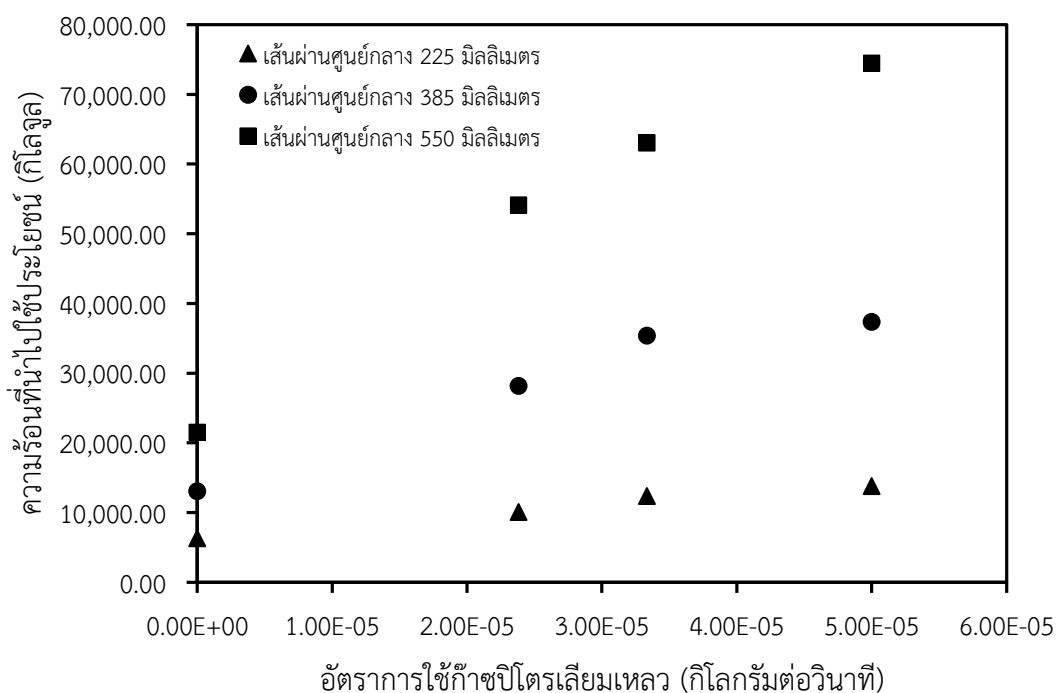
4.3 ความร้อนใช้ประโยชน์

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนใช้ประโยชน์กับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเท่ากับ 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร ตามลำดับ แกนตั้งแสดงความร้อนใช้ประโยชน์มีหน่วยเป็น กิโลจูล แกนนอนแสดงอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวินาที เมื่อพิจารณาความร้อนใช้ประโยชน์กับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ 0.00 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าความร้อนใช้ประโยชน์ของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 6,305.51 13,096.01 และ 21,550.64 กิโลจูล ตามลำดับ ที่ 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร

385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าความร้อนใช้ประโยชน์ของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 10,090.84 28,192.70 และ 54,133.26 กิโลจูล ตามลำดับ ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 12,384.59 35,378.99 และ 63,044.26 กิโลจูล ตามลำดับ และที่ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าอัตราการให้ความร้อนของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 13,804.03 37,357.95 และ 74,471.00 กิโลจูล ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกับอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว จากขนาดเตา 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 6,305.51 10,090.84 12,384.59 และ 13,804.03 กิโลจูล ตามลำดับ ขนาดเตา 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 13,096.01 28,192.70 35,378.99 และ 37,357.95 กิโลจูล ตามลำดับ และ ขนาดเตา 550 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ประสิทธิภาพของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 21,550.64 54,133.26 63,044.26 และ 74,471.00 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนใช้ประโยชน์กับอัตราไหลก๊าซหุงต้มแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่ออัตราไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 5.0×10^{-5} กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความร้อนใช้ประโยชน์ของเตา 225 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้นจาก 6,305.51 กิโลจูล ถึง 13,804.03 กิโลจูล และของเตา 385 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้นจาก 13,096.01 กิโลจูล ถึง 37,357.95 กิโลจูล ความร้อนใช้ประโยชน์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว เพราะว่าอัตราไหลของก๊าซที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความร้อนแก่ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของซีลี้อย ทำให้ปริมาณซีลี้อยที่ไม่เผาไหม้ลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือปริมาณก๊าซไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้นจากซีลี้อยที่ทำการทดลองเป็นผลให้ความร้อนใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น

พบว่าความร้อนใช้ประโยชน์ ของเตา 225 มิลลิเมตร น้อยกว่าเตา 385 มิลลิเมตรในทุกอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว ผลจากหัวข้อข้อ 4.1 แสดงให้เห็นว่าทั้งสองเตามีกำลังเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความร้อนใช้ประโยชน์ของเตาขึ้นอยู่กับเวลาที่ติดเตาเท่านั้น เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปแล้วว่าทั้งก๊าซหุงต้มและก๊าซไพโรไลซิสเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนและก๊าซไพโรไลซิสเป็นก๊าซเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของซีลี้อยที่ถูกบรรจุอยู่ในเตา ดังนั้นความร้อนที่ใช้ประโยชน์ที่มากกว่าของเตา 385 มิลลิเมตรเกิดจากมวลของซีลี้อยที่บรรจุอยู่มากกว่านั่นเอง กล่าวโดยสรุปคือขนาดของเตาที่โตขึ้นสามารถบรรจุซีลี้อยได้มากกว่าทำให้ติดเตาได้นานกว่าและให้ความร้อนได้มากกว่าแต่ไม่มีผลต่อกำลังและอัตราการให้ความร้อนของเตา



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนใช้ประโยชน์และอัตราไหลของก๊าซหุงต้ม

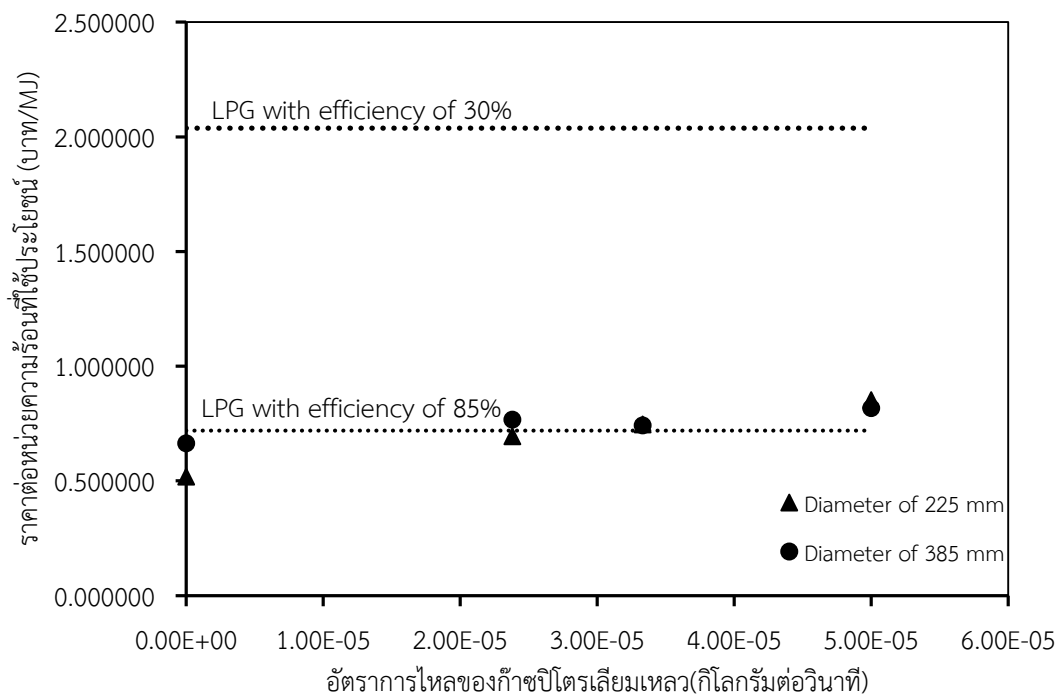
การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียม ส่งผลให้อัตราการใช้ความร้อนเพิ่มขึ้นที่ทุกๆ การแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา คือ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นจาก 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ส่งผลให้ความร้อนใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น 6,305.51 10,090.84 12,384.59 และ 13,804.03 กิโลจูลตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ส่งผลให้ความร้อนใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น 13,096.01 28,192.70 35,378.99 และ 37,357.95 กิโลจูล ตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ส่งผลให้ความร้อนใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นจาก 21,550.64 56,066.59 63,044.26 และ 74,471.00 กิโลจูลตามลำดับ

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนเชื้อเพลิงกับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเท่ากับ 225 มิลลิเมตร และ 385 มิลลิเมตร แกนตั้งแสดงต้นทุนเชื้อเพลิงมีหน่วยเป็นบาทต่อเมกะจูล แกนนอนแสดงอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวินาที เมื่อพิจารณาต้นทุนเชื้อเพลิงกับอัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ 0.00 กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร และ 385 มิลลิเมตร พบว่าต้นทุนของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 0.52 และ 0.66 บาทต่อ

เมกะจูล ที่ 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใน มีค่าเท่ากับ 0.69 และ 0.77 บาทต่อเมกะจูล ที่ 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการมีแนวโน้มลดลง มีค่าเท่ากับ 0.75 และ 0.74 บาทต่อเมกะจูล ตามลำดับ และที่ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร 385 มิลลิเมตร และ 550 มิลลิเมตร พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการมีแนวโน้มลดลง มีค่าเท่ากับ 0.85 และ 0.81 บาทต่อเมกะจูล และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของต้นทุนเชื้อเพลิงกับอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว จากขนาดเตา 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 0.52 0.69 0.75 และ 0.85 บาทต่อเมกะจูล ตามลำดับ ขนาดเตา 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 0.66 0.77 0.74 และ 0.82 บาทต่อเมกะจูล ตามลำดับ

ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่อหน่วยความร้อนที่ใช้ประโยชน์แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่ออัตราไหลของก๊าซหุงต้มเพิ่มขึ้นจาก 0.00 ถึง 5.00×10^{-5} ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงของเตา 225 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจาก 0.52 บาทต่อเมกะจูล ถึง 0.85 บาทต่อเมกะจูล ของเตา 385 มิลลิเมตร จาก 0.66 บาทต่อเมกะจูล ถึง 0.82 บาทต่อเมกะจูล เมื่อทำการคำนวณต้นทุนของเตาที่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ประสิทธิภาพ 30% และ 85% จะได้ต้นทุนที่ 2.04 บาทต่อเมกะจูล และ 0.72 บาทต่อเมกะจูลตามลำดับ (ค่าความร้อนต่ำของก๊าซหุงต้มประมาณ 45.80 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) โดยทั่วไปประสิทธิภาพเตา ก๊าซหุงต้มอยู่ที่ 10-30% ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงร่วมก๊าซปิโตรเลียมเหลวและชีเลื่อยอัดมีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ถูกกว่าการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.5 ต้นทุนต่อหน่วยความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ที่ อัตราไหลก๊าซหุงต้มต่างๆ

พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงกับอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว จากขนาดเตา 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 0.52 0.69 0.75 และ 0.85 บาทต่อกิโลจูล ตามลำดับ ขนาดเตา 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที พบว่าต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 0.66 0.77 0.74 และ 0.82 บาทต่อเมกะจูลตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าต้นทุนจากการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพียงอย่างเดียว

4.5 สมดุลพลังงาน

4.5.1 สมดุลพลังงานของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร จากตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณความร้อนในระบบการเผาไหม้รวมขึ้นเล็กน้อยอัดในภาชนะกับอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร สดมภ์เป็นอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 4 อัตราคือ 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ ส่วนแถวแสดงปริมาณความร้อนที่เข้า-ออกระบบมีหน่วยเป็นกิโลจูล แถวแรกเป็นปริมาณความร้อนเข้า (Q_{in}) มีค่า 50,649.15 56,059.28 58,322.20 และ 62,850.19 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่สองเป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง (Q_{mt}) มีค่า 720.98 720.98 720.98 และ 720.98 กิโลจูลตามลำดับ แถวที่สามเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่หมด (Q_{ub}) มีค่าเป็น 12,845.35

7,501.53 3,096.66 และ 2,173.56 กิโลจูล ตามลำดับ แฉวที่สี่เป็นความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{icp}) มีค่าเป็น 23,816.36 26,729.39 29,666.72 และ 29,668.35 แฉวที่ห้าเป็นปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวเตา (Q_{sf}) มีค่าเป็น 466.17 466.17 919.61 และ 277.65 กิโลจูล ตามลำดับ แฉวที่หก (Q_{st}) เป็นปริมาณความร้อนสูญเสียที่ปล่องเตา มีค่าเป็น 5,027.62 5,032.36 5,033.91 และ 5,037.54 กิโลจูล ตามลำดับ แฉวที่เจ็ดเป็นความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (Q_{uf}) มีค่าเป็น 6,305.51 10,090.84 12,384.59 และ 13,804.03 กิโลจูล ตามลำดับ แฉวที่แปดเป็นปริมาณความร้อนที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด (Q_{ud}) มีค่าเป็น 1,467.17 5,518.01 6,499.75 และ 11,168.07 กิโลจูล ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 สมดุลความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร

ความร้อนในระบบเตาเผาพร้อม (กิโลจูล)	อัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว(กิโลกรัมต่อวินาที)			
	0.00	2.38×10^{-5}	3.33×10^{-5}	5.00×10^{-5}
ความร้อนเข้า(Q_{in})	50,649.15	56,059.28	58,322.20	62,850.19
สูญเสียจากความชื้น(Q_{mt})	720.98	720.98	720.98	720.98
เผาไหม้ไม่หมด(Q_{ub})	12,845.35	7,501.53	3,096.66	2,173.56
เผาไหม้ไม่สมบูรณ์(Q_{icp})	23,816.36	26,729.39	29,666.72	29,668.35
สูญเสียที่ผิว(Q_{sf})	466.17	466.17	919.61	277.65
สูญเสียจากปล่อง(Q_{st})	5,027.62	5,032.36	5,033.91	5,037.54
ความร้อนใช้ประโยชน์(Q_{uf})	6,305.51	10,090.84	12,384.59	13,804.03
ไม่ได้ทำการตรวจวัด(Q_{ud})	1,467.17	5,518.01	6,499.75	11,168.07

จากตาราง 4.2 แสดงสมดุลความร้อนของเตา ขนาด 225 มิลลิเมตรในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความสดมภ์ แสดง อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตรตามลำดับ แฉวแรกเป็นค่าความร้อนเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยให้ความร้อนเข้าสู่ระบบเป็น ร้อยเปอร์เซ็นต์ แฉวที่สองเป็นความร้อนสูญเสียจากความชื้นในขี้เถ้า มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 1.42 1.29 1.24 และ 1.15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แฉวที่สามเป็นความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่เผาไหม้ไม่หมดมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 25.36 13.38 5.31 และ 3.46 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แฉวที่สี่เป็นความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 47.02 47.68 50.87 และ 47.20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แฉวที่ห้าเป็นการสูญเสียความร้อนที่ผิวเตามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว มีค่าเป็น 0.92 0.83 1.58 และ 0.44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แฉวที่หกเป็นการสูญเสียความร้อนทางปล่อง มีแนวโน้มลดลง

เมื่ออัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 9.93 8.98 8.63 และ 8.02 แกวที่เจ็ด เป็นความร้อนใช้ประโยชน์มีค่าต่ำที่อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเป็นศูนย์ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเผา ร่วมแต่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราไหลก๊าซเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 12.45 18.00 21.23 และ 21.96 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับแกวที่แปดเป็นปริมาณความร้อนที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด มีค่าเป็น 2.90 9.84 11.14 และ 17.77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 สมดุลความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ความร้อนในระบบเตาเผาพร้อม (%)	อัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว(กิโลกรัมต่อวินาที)			
	0.00	2.38×10^{-5}	3.33×10^{-5}	5.00×10^{-5}
ความร้อนเข้า(Q_{in})	100.00	100.00	100.00	100.00
สูญเสียจากความชื้น(Q_{mt})	1.42	1.29	1.24	1.15
เผาไหม้ไม่หมด(Q_{ub})	25.36	13.38	5.31	3.46
เผาไหม้ไม่สมบูรณ์(Q_{icp})	47.02	47.68	50.87	47.20
สูญเสียที่ผิว(Q_{sf})	0.92	0.83	1.58	0.44
สูญเสียจากปล่อง(Q_{st})	9.93	8.98	8.63	8.02
ความร้อนใช้ประโยชน์(Q_{uf})	12.45	18.00	21.23	21.96
ไม่ได้ทำการตรวจวัด(Q_{ud})	2.90	9.84	11.14	17.77

การเพิ่มอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมจาก 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลจูลต่อวินาที ทำให้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นจาก 50,649.15 กิโลจูล เป็น 62,850.19 กิโลจูล หรือคิดเป็น 24.09 เปอร์เซ็นต์ โดยความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการเพิ่มอัตราไหลของก๊าซ ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสในชีเลื้อย เป็นผลให้มีการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ปริมาณชีเลื้อยที่เหลือจากการเผาไหม้จึงลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียความร้อนจากร้อนจากการเผาไหม้ไม่หมดลดลง จาก 25.36 เป็น 3.46 เปอร์เซ็นต์ การสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีค่าอยู่ในช่วง จาก 47.02-50.87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องการจำกัดปริมาณอากาศในการเผาไหม้จากการออกเตาที่มีช่องอากาศคงที่ เมื่อมีการเผาไหม้เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น ส่วนความร้อนใช้ประโยชน์มีค่า 12.45 เปอร์เซ็นต์เมื่อเผาไหม้ชีเลื้อยเพียงอย่างเดียว แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระบบการเผาไหม้ร่วมโดยเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลก๊าซที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าในช่วง 18.00 และ 21.96 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบการเผาไหม้ร่วมทำให้ประสิทธิภาพของเตาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใช้ระบบการเผาไหม้ร่วม โดยประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าเมื่อใช้ระบบการเผาไหม้ร่วม

4.5.2 สมดุลพลังงานของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณความร้อนในระบบการเผาไหม้ร่วมเชื้อเพลิงอัดในภาชนะกับอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร สดมภ์ เป็นอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 4 อัตราคือ 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} มีหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนแถวแสดงปริมาณความร้อนที่เข้า-ออกระบบมีหน่วยเป็นกิโลจูล แถวแรกเป็นปริมาณความร้อนเข้า (Q_{in}) มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการทดลอง มีค่าเท่ากับ 159,849.58 182,051.06 187,222.26 และ 193,610.80 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่สอง เป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง (Q_{mt}) มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการทดลองมีค่าเท่ากับ 2,265.94 2,265.94 2,145.25 และ 2,114.47 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่สามเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่หมด (Q_{ub}) มีค่าต่ำในช่วงแรกเพิ่มขึ้นในช่วงกลาง และลดลงเล็กน้อยในช่วงท้ายมีค่าเป็น 98,340.62 40,791.29 38,798.30 และ 34,604.00 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่สี่เป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{icp}) มีค่าต่ำในช่วงแรก เพิ่มขึ้นในช่วงกลางและลดลงในช่วงท้ายมีค่าเป็น 40,036.92 65,410.18 69,447.04 และ 67,161.96 แถวที่ห้าเป็นปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวเตา (Q_{sf}) มีค่าต่ำในช่วงแรกเพิ่มขึ้นในช่วงกลางและคงที่ในช่วงท้ายมีค่าเป็น 250.20 372.15 525.88 และ 377.77 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่หกเป็นปริมาณความร้อนสูญเสียที่ปล่องเตา (Q_{st}) มีค่าค่อนข้างคงที่มีค่าเป็น 5,026.56 5,052.86 5,401.57 และ 4,063.70 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่เจ็ดเป็นความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (Q_{uf}) มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการทดลองมีค่าเป็น 13,096.01 28,192.69 35,378.99 และ 37,357.95 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่แปดเป็นปริมาณความร้อนที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด (Q_{ud}) มีค่าสูงในช่วงแรกลดลงในช่วงกลางและเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายมีค่าเป็น 833.34 39,965.94 35,525.23 และ 47,930.95 กิโลจูล ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 สมดุลความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร (ปริมาณความร้อน)

ความร้อนในระบบเตาเผาพร้อม (กิโลจูล)	อัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว(กิโลกรัมต่อวินาที)			
	0.00	2.38×10^{-5}	3.33×10^{-5}	5.00×10^{-5}
ความร้อนเข้า (Q_{in})	159,849.58	182,051.06	187,222.26	193,610.80
สูญเสียจากความชื้น (Q_{mt})	2,265.94	2,265.94	2,145.25	2,114.47
เผาไหม้ไม่หมด (Q_{ub})	98,340.62	40,791.29	38,798.30	34,604.00
เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{icp})	40,036.92	65,410.18	69,447.04	67,161.96
สูญเสียที่ผิว (Q_{sf})	250.20	372.15	525.88	377.77
สูญเสียจากปล่อง (Q_{st})	5,026.56	5,052.86	5,401.57	4,063.70
ความร้อนใช้ประโยชน์ (Q_{uf})	13,096.01	28,192.69	35,378.99	37,357.95
ไม่ได้ทำการตรวจวัด (Q_{ud})	833.34	39,965.94	35,525.23	47,930.95

จากตาราง 4.4 แสดงสมดุลความร้อนของเตา ขนาด 385 มิลลิเมตรในรูปเปอร์เซ็นต์ความสดมภ์ แสดง อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตรตามลำดับ แถวเป็นค่าความร้อนเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยให้ความร้อนเข้าสู่ระบบเป็น ร้อยเปอร์เซ็นต์ แถวที่สองเป็นความร้อนสูญเสียจากความชื้นในขี้เถ้า มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 1.42 1.24 1.15 และ 1.09 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับแถวที่สามเป็นความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่เผาไหม้ไม่หมดมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 61.52 22.41 20.72 และ 17.87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แถวที่สี่ เป็นความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 25.05 35.95 37.09 และ 34.69 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แถวที่ห้าเป็นการสูญเสียความร้อนที่ผิวเตามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว มีค่าเป็น 0.16 0.20 0.28 และ 0.20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แถวที่หกเป็นการสูญเสียความร้อนทางปล่อง มีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 3.14 2.78 2.89 และ 2.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แถวที่เจ็ด เป็นความร้อนใช้ประโยชน์มีค่าต่ำที่อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเป็นศูนย์ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเผาพร้อมแต่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 8.19 15.49 18.90 และ 19.30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับแถวที่แปดเป็นปริมาณความร้อนที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด มีค่าเป็น 0.52 21.95 18.97 และ 24.76 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4. 4สมดุลความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ความร้อนในระบบเตาเผาพร้อม (%)	อัตราไหล่ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว(กิโลกรัมต่อวินาที)			
	0.00	2.38×10^{-5}	3.33×10^{-5}	5.00×10^{-5}
ความร้อนเข้า(Q_{in})	100.00	100.00	100.00	100.00
สูญเสียจากความชื้น(Q_{mt})	1.42	1.24	1.15	1.09
เผาไหม้ไม่หมด(Q_{ub})	61.52	22.41	20.72	17.87
เผาไหม้ไม่สมบูรณ์(Q_{icp})	25.05	35.95	37.09	34.69
สูญเสียที่ผิว(Q_{sf})	0.16	0.20	0.28	0.20
สูญเสียจากปล่อง(Q_{st})	3.14	2.78	2.89	2.10
ความร้อนใช้ประโยชน์(Q_{uf})	8.19	15.49	18.90	19.30
ไม่ได้ทำการตรวจวัด(Q_{ud})	0.52	21.95	18.97	24.76

การเพิ่มอัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมจาก 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที ทำให้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นจาก 159,849.58 กิโลจูล เป็น 193,610.80 กิโลจูล หรือคิดเป็น 21.12 เปอร์เซ็นต์ โดยความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการเพิ่ม

อัตราไหลของก๊าซ ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสในชี้เลื่อยเป็นผลให้มีการเผาไหม้ชีวมวลเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณชี้เลื่อยที่ไม่เผาไหม้ไม่น้อยลง โดยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่หมดลดลง จาก 61.52 เป็น 17.87 เปอร์เซ็นต์ แต่การสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จาก 25.05 เป็น 34.69 เปอร์เซ็นต์ เพราะเตาที่ใช้ในการทดลองออกแบบมาไม่มีช่องอากาศเข้าคงที่ เมื่อมีการเผาไหม้เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น ส่วนความร้อนใช้ประโยชน์มีค่า 8.19 เปอร์เซ็นต์เมื่อเผาชี้เลื่อยเพียงอย่างเดียว และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระบบการเผาไหม้ร่วมมีค่าในช่วง 15.49 ถึง 19.30 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบการเผาไหม้ร่วมทำให้ประสิทธิภาพของเตาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ชี้เลื่อยเพียงอย่างเดียว โดยประสิทธิภาพเตาเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าเมื่อใช้ระบบการเผาไหม้ร่วม

4.5.3 สมดุลพลังงานของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณความร้อนในระบบการเผาไหม้ร่วมชี้เลื่อยอัดในภาชนะกับอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร สดมภ์ เป็นอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 4 อัตราคือ 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} มีหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนแถวแสดงปริมาณความร้อนที่เข้า-ออกระบบมีหน่วยเป็นกิโลจูล แถวแรกเป็นปริมาณความร้อนเข้า (Q_{in}) มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการทดลอง มีค่าเท่ากับ 350,182.20 390,840.68 392,698.77 และ 402,300.07 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่สอง เป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง (Q_{m1}) มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการทดลองมีค่าเท่ากับ 4,943.86 5,079.82 4,943.86 และ 4,943.86 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่สามเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่หมด (Q_{ub}) มีค่าต่ำในช่วงแรกเพิ่มขึ้นในช่วงกลาง และลดลงเล็กน้อยในช่วงท้ายมีค่าเป็น 236,941.52 106,626.38 99,181.95 และ 84,434.68 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่สี่เป็นความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{ub}) มีค่าต่ำในช่วงแรก เพิ่มขึ้นในช่วงกลางและลดลงในช่วงท้ายมีค่าเป็น 70,559.83 144,906.46 136,636.78 และ 114,950.00 แถวที่ห้าเป็นปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวเตา (Q_{sf}) มีค่าต่ำในช่วงแรกเพิ่มขึ้นในช่วงกลางและคงที่ในช่วงท้ายมีค่าเป็น 1,817.90 7,502.99 5,140.81 และ 5,140.81 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่หกเป็นปริมาณความร้อนสูญเสียที่ปล่องเตา (Q_{st}) มีค่าค่อนข้างคงที่มีค่าเป็น 5,037.96 5,041.05 5,049.55 และ 5,077.04 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่เจ็ดเป็นความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (Q_{uf}) มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงการทดลองมีค่าเป็น 21,550.64 54,133.26 63,044.26 และ 74,471.00 กิโลจูล ตามลำดับ แถวที่แปดเป็นปริมาณความร้อนที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด (Q_{ud}) มีค่าสูงในช่วงแรกลดลงในช่วงกลางและเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายมีค่าเป็น 9,330.00 67,550.72 78,701.55 และ 113,282.68 กิโลจูล ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 สมดุลความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร(ปริมาณความร้อน)

ความร้อนในระบบเตาเผาพร้อม (กิโลจูล)	อัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (กิโลกรัมต่อวินาที)			
	0.00	2.38×10^{-5}	3.33×10^{-5}	5.00×10^{-5}
ความร้อนเข้า(Q_{in})	350,182.20	390,840.68	392,698.77	402,300.07
สูญเสียจากความชื้น(Q_{mt})	4,943.86	5,079.82	4,943.86	4,943.86
เผาไหม้ไม่หมด(Q_{ub})	236,941.52	106,626.38	99,181.95	84,434.68
เผาไหม้ไม่สมบูรณ์(Q_{icp})	70,559.83	144,906.46	136,636.78	114,950.00
สูญเสียที่ผิว(Q_{sf})	1,817.90	7,502.99	5,140.81	5,140.81
สูญเสียจากปล่อง(Q_{st})	5,037.96	5,041.05	5,049.55	5,077.04
ความร้อนใช้ประโยชน์(Q_{uf})	21,550.64	54,133.26	63,044.26	74,471.00
ไม่ได้ทำการตรวจวัด(Q_{ud})	9,330.50	67,550.72	78,701.55	113,282.68

จากตาราง 4.6 แสดงสมดุลความร้อนของเตา ขนาด 550 มิลลิเมตรในรูปเปอร์เซ็นต์ สดมภ์ แสดง อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อตารางเมตรตามลำดับ แถวเป็นค่าความร้อนเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยให้ความร้อนเข้าสู่ระบบเป็น ร้อยเปอร์เซ็นต์ แถวที่สองเป็นความร้อนสูญเสียจากความชื้นในชี้เส้อย มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 1.41 1.30 1.26 และ 1.23 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับแถวที่สามเป็นความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่เผาไหม้ไม่หมดมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 67.66 27.28 25.26 และ 20.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แถวที่สี่ เป็นความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 20.15 38.08 34.79 และ 28.57 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แถวที่ห้าเป็นการสูญเสียความร้อนที่ผิวเตามีมีค่าเป็น 0.52 1.92 1.31 และ 1.28 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พบว่ามีค่าต่ำมากเนื่องจากการหุ้มฉนวนหนาถึง 100 มิลลิเมตร แถวที่หกเป็นการสูญเสียความร้อนทางปล่อง มีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 1.44 1.29 1.29 และ 1.26 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แถวที่เจ็ด เป็นความร้อนใช้ประโยชน์มีค่าต่ำที่อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเป็นศูนย์ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเผาพร้อมแต่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราไหล่ก๊าซเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 6.15 13.85 16.05 และ 18.51 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับแถวที่แปดเป็นปริมาณความร้อนที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด มีค่าเป็น 2.66 17.28 20.04 และ 28.16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 สมดุลความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร(เป็นเปอร์เซ็นต์)

ความร้อนในระบบเตาเผาพร้อม (%)	อัตราไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (กิโลกรัมต่อวินาที)			
	0.00	2.38×10^{-5}	3.33×10^{-5}	5.00×10^{-5}
ความร้อนเข้า(Q_{in})	100.00	100.00	100.00	100.00
สูญเสียจากความชื้น(Q_{mt})	1.41	1.30	1.26	1.23
เผาไหม้ไม่หมด(Q_{ub})	67.66	27.28	25.26	20.99
เผาไหม้ไม่สมบูรณ์(Q_{icp})	20.15	37.08	34.79	28.57
สูญเสียที่ผิว(Q_{sf})	0.52	1.92	1.31	1.28
สูญเสียจากปล่อง(Q_{st})	1.44	1.29	1.29	1.26
ความร้อนใช้ประโยชน์(Q_{uf})	6.15	13.85	16.05	18.51
ไม่ได้ทำการตรวจวัด(Q_{ud})	2.66	17.28	20.04	28.16

การเพิ่มอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมจาก 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลจูลต่อวินาที ทำให้ปริมาณ ความร้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นจาก 350,182.20 กิโลจูล เป็น 402,300.07 กิโลจูล หรือคิดเป็น 14.88 เปอร์เซ็นต์ โดยความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้ได้จากการเพิ่มอัตราไหลของก๊าซ และความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาไฟโวลซิซิสในซีล้อยมากขึ้นเป็นผลให้ชีวมวลถูกเผาไหม้เพิ่มขึ้น มีซีล้อยเหลือจากการเผาไหม้น้อยลงโดยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่หมดลดลง จาก 67.66 เป็น 20.99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีค่า 20.15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ใช้การเผาไหม้ร่วม และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้การเผาไหม้ร่วมโดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราไหลก๊าซ มีค่าจาก 37.08 เป็น 28.57 เปอร์เซ็นต์ เพราะเตาที่ใช้ในการทดลองออกแบบมามีช่องอากาศเข้าคังที่ เมื่อมีการเผาไหม้เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ส่งผลให้มีการไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มอัตราไหลก๊าซซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และความร้อนสูงค่าการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จึงลดลง ส่วนความร้อนใช้ประโยชน์มีค่า 6.15 เปอร์เซ็นต์เมื่อใช้ซีล้อยเป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว และมีเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระบบการเผาไหม้ร่วม โดยมีค่าในช่วง 13.85 ถึง 18.51 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบการเผาไหม้ร่วมทำให้ประสิทธิภาพของเตาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ซีล้อยเพียงอย่างเดียว โดยประสิทธิภาพเตาเพิ่มขึ้นประมาณสองถึงสามเท่าเมื่อใช้ระบบการเผาไหม้ร่วม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงร่วมชีวมวลอัดในภาชนะปิด และ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยก๊าซปิโตรเลียมเหลวทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้การเผาไหม้มีความเสถียร และมี อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขึ้นในชีวมวลและปล่อยก๊าซไพโรไลซิสออกมา ทำให้ เกิดการเผาไหม้ร่วมของก๊าซไพโรไลซิส คาร์บอนคงตัวส่วนที่เป็นถ่านคุดของชีวมวลและ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวรวมกันไป ซึ่งในการศึกษานี้ทำโดยใช้เตาทรงกระบอกวัสดุทำด้วยเหล็กกล้าหุ้ม ด้วยฉนวนเซรามิคไฟเบอร์ จำนวน 3 เตา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตร ซึ่งภายในบรรจุเชื้ออัด 3.5 กิโลกรัม 11.0 กิโลกรัม และ 24 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยปรับอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็น 3 อัตราคือ 0.00 2.38×10^{-5} 3.33×10^{-5} และ 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที

5.2 สรุปผลการทดลอง

อัตราการให้ความร้อนและกำลังเฉลี่ยของเตามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหลของก๊าซ ปิโตรเลียมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตร อัตราการให้ความร้อน เพิ่มขึ้นจาก 1.53-3.07 1.39-3.37 และ 1.55-4.22 องศาเซลเซียส ต่อนาทีตามลำดับ ส่วนกำลังเฉลี่ยของเตาเพิ่มขึ้นจาก 1.00-2.30 0.97-2.35 และ 1.38-3.10

ประสิทธิภาพของเตาเมื่ออัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเตา เพิ่มขึ้นที่ทุกๆ การแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา ที่เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตรประสิทธิภาพเตาเพิ่มขึ้นจาก 12.45-21.96 8.19-19.30 และ 6.15-18.51 ตามลำดับ

ความร้อนใช้ประโยชน์เมื่ออัตราการไหลของก๊าซปิโตรเลียมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการให้ ความร้อนของเตาเพิ่มขึ้นที่ทุกๆ การแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา ที่เตาขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 225 385 และ 550 มิลลิเมตรความร้อนใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นจาก 6,305.51-13,804.03 13,096.01-37,357.95 และ 21,550.64-74,471.00 กิโลจูลตามลำดับ

ต้นทุนเชื้อเพลิงของกระบวนการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพิ่มขึ้น ที่ เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 และ 385 ต้นทุนเชื้อเพลิงเพิ่มจาก 0.52-0.85 และ 0.66-0.82 บาทต่อเมกะจูลตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าต้นทุนจากการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเพียงอย่างเดียว

การศึกษาสมดุลพลังงานพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลวทำให้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น ที่เตาขนาด 225 385 และ 550 มิลลิเมตรเพิ่มขึ้น 24.09 21.12 และ 14.88 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้นช่วยเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสส่งผลให้มีการเผาไหม้เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่หมดลดลง ที่เตาขนาด 225 385 และ 550 มิลลิเมตรลดลงเป็น 3.46 17.87 และ 20.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการจำกัดปริมาณอากาศ ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ส่วนความร้อนใช้ประโยชน์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระบบการเผาไหม้ร่วม แสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบการเผาไหม้ร่วมทำให้ประสิทธิภาพของเตาสูงขึ้นสองเท่าเมื่อเทียบกับการไม่ใช้ระบบการเผาไหม้ร่วม

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเผาไหม้ร่วมของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดในภาชนะกับการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยทำการศึกษาในเตาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 3 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่าน 225 385 และ 550 มิลลิเมตร ที่มีความสูงเท่ากันคือ 400 มิลลิเมตร พบว่าเกิดความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เป็นจำนวนมาก เนื่องการออกแบบเตาที่มีการจำกัดออกซิเจน จึงควรปรับปรุงการเผาไหม้ให้สมบูรณ์โดยเพิ่มออกซิเจนให้เพียงพอ ทำได้โดยการเพิ่มความสูงของเตาเพื่อเพิ่มแรงดูดของอากาศเข้าในขบวนการเผาไหม้ได้มากขึ้นและเป็นการเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น ซึ่งการปรับปรุงนี้คาดว่าจะทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพของเตาสูงขึ้นอีกด้วย

รายการอ้างอิง

1. กระทรวงพลังงาน, แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% กระทรวงพลังงาน, Editor. 2552, Energy Complex: กรุงเทพมหานคร. p. 1-29.
2. Program., S.T.I., *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute (Contributor), U.S. Department of Energy (Contributor). ed. D.o. Energy. 2014, Colorado 80401-3393 CreateSpace Independent Publishing Platform.
3. Janajreh, I. and M. Al Shrah, *Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of wood chips*. Energy Conversion and Management, 2013. 65(Supplement C): p. 783-792.
4. Jorapur, R.M. and A.K. Rajvanshi, *Development of a sugarcane leaf gasifier for electricity generation*. Biomass and Bioenergy, 1995. 8(2): p. 91-98.
5. Larson, T.B.R.a.R., *A WOOD-GAS STOVE FOR DEVELOPING COUNTRIES in Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. 1996, The Biomass Energy Foundation: Canada. p. 20-24.
6. Kallis, K.X., G.A. Pellegrini Susini, and J.E. Oakey, *A comparison between Miscanthus and bioethanol waste pellets and their performance in a downdraft gasifier*. Applied Energy, 2013. 101(Supplement C): p. 333-340.
7. Kuo, P.-C., W. Wu, and W.-H. Chen, *Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis*. Fuel. 117, **Part B(0)**: p. 1231-1241.
8. Rajvanshi, A.K., *BIOMASS GASIFICATION*. Alternative Energy in Agriculture, 1986. **II**: p. 83-102.
9. Shu Lai Mok, W., et al., *Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor*. Vol. 31. 1992.
10. Acharjee, T.C., *Thermal pretreatment options for lignocellulosic biomass*. 2010.
11. Pimchuai, A., A. Dutta, and P. Basu, *Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties†*. Vol. 24. 2010.
12. Felfli, F.F., et al., *Wood briquette torrefaction*. Energy for Sustainable Development, 2005.

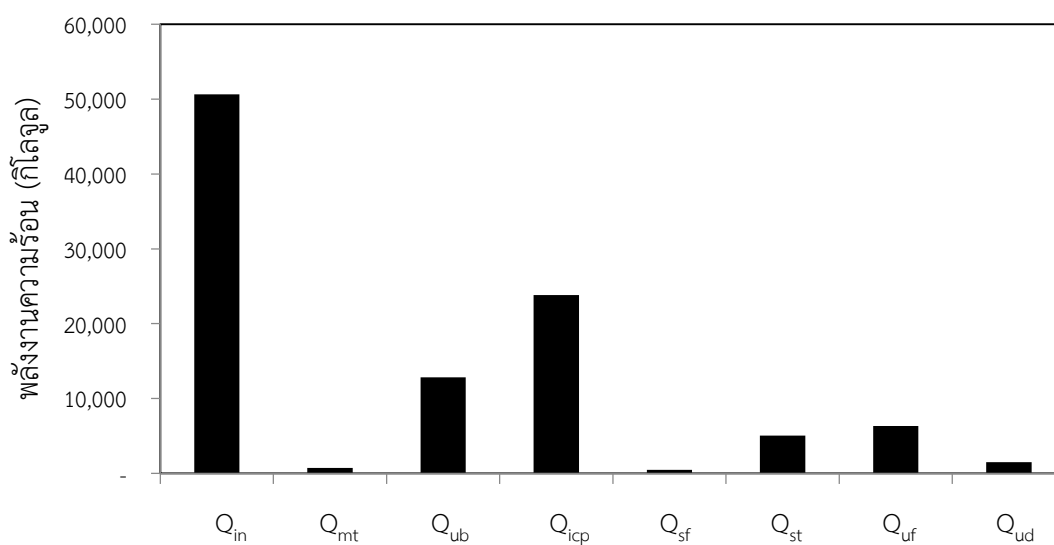
- 9(3): p. 19-22.
13. Peng, J., et al., *A Study of Particle Size Effect on Biomass Torrefaction and Densification*. Vol. 26. 2012. 3826–3839.
 14. Bergström, D., et al., *Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets*. Fuel Processing Technology, 2008. 89(12): p. 1324-1329.
 15. Ståhl, M., et al., *Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets*. Biomass and Bioenergy, 2004. 27(6): p. 621-628.
 16. Zamorano, M., et al., *A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues*. Renewable Energy, 2011. 36(11): p. 3133-3140.
 17. Zainal, Z.A., et al., *Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials*. Energy Conversion and Management, 2001. 42(12): p. 1499-1515.
 18. Simone, M., et al., *Gasification of pelletized biomass in a pilot scale downdraft gasifier*. Bioresource Technology, 2012. 116(Supplement C): p. 403-412.
 19. Prins, M.J., K.J. Ptasinski, and F.J.J.G. Janssen, *More efficient biomass gasification via torrefaction*. Energy, 2006. 31(15): p. 3458-3470.
 20. P, R., et al., *Performance evaluation of three types of forced draft cook stoves using fuel wood and coconut shell*. Vol. 49. 2013. 333–340.
 21. Strehler, A., *Technologies of wood combustion*. Ecological Engineering, 2000. 16(Supplement 1): p. 25-40.
 22. Varunkumar, S., N.K.S. Rajan, and H.S. Mukunda, *Experimental and computational studies on a gasifier based stove*. Energy Conversion and Management, 2012. 53(1): p. 135-141.
 23. Grimsby, L.K. and E.J.L. Borgenvik, *Fuelling sawdust stoves with jatropa fruit coats*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2013. 2(Supplement C): p. 12-18.
 24. Pietro Parmigiani, S., et al., *Design and performance assessment of a rice husk fueled stove for household cooking in a typical sub-Saharan setting*. Vol. 23. 2014. 15-24.





กราฟสมดุลความร้อนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที (D225F0)
ตารางภาคผนวก ก. 1 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที

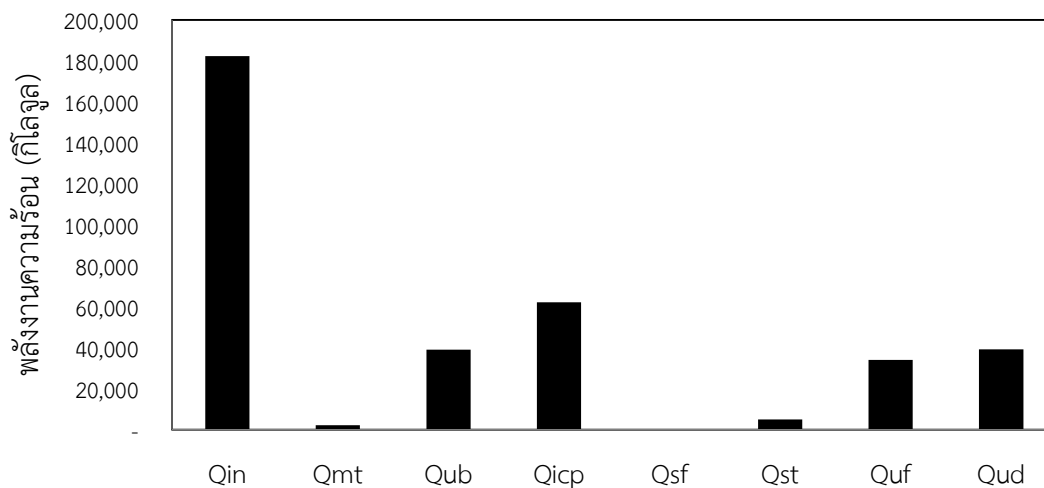
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	49,275.15	กิโลจูล	Q_{mt}	720.98	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	1,374.00	กิโลจูล	Q_{ub}	12,845.35	กิโลจูล
			Q_{icp}	23,816.36	กิโลจูล
			Q_{sf}	466.17	กิโลจูล
			Q_{st}	5,027.62	กิโลจูล
			Q_{uf}	6,305.51	กิโลจูล
			Q_{ud}	1,467.17	กิโลจูล
รวม	50,649.15	กิโลจูล		50,649.15	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.1 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D225F7)
ตารางภาคผนวก ก.2 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

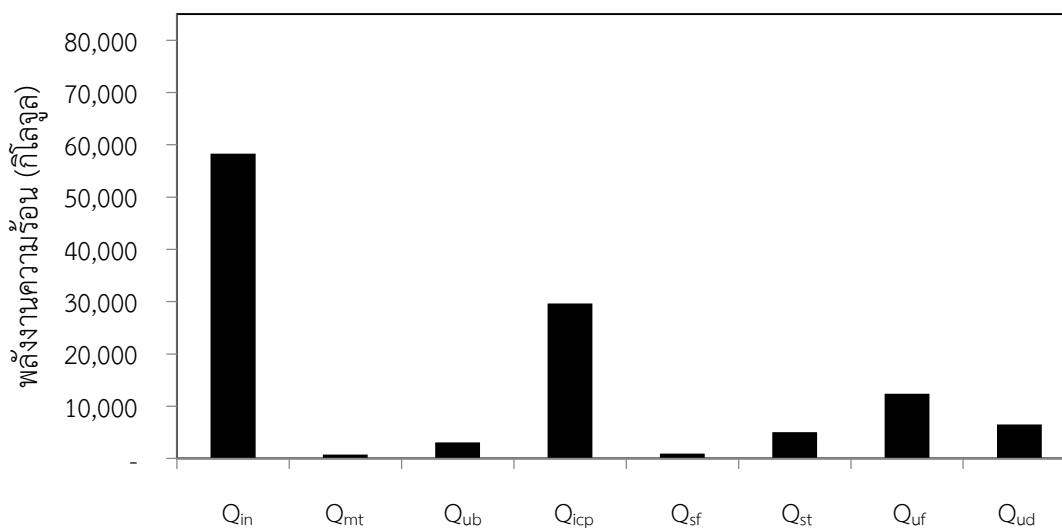
ความร้อนเข้าระบบ			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	49,189.28	กิโลจูล	Q_{mt}	720.98	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	6,870.00	กิโลจูล	Q_{ub}	7,501.53	กิโลจูล
			Q_{icp}	26,729.39	กิโลจูล
			Q_{sf}	466.17	กิโลจูล
			Q_{st}	5,032.36	กิโลจูล
			Q_{uf}	10,090.84	กิโลจูล
			Q_{ud}	5,518.01	กิโลจูล
รวม	56,059.28	กิโลจูล		56,059.28	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.2 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
วินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D225F14)
ตารางภาคผนวก ก 3 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

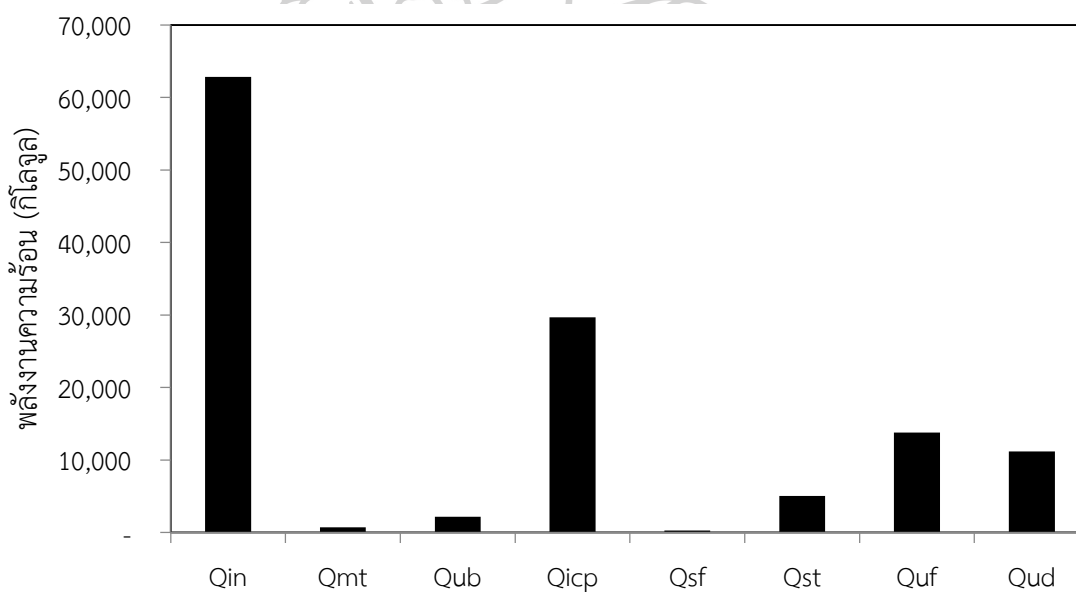
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ซีล้อย	49,162.20	กิโลจูล	Q_{mt}	720.98	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	9,160.00	กิโลจูล	Q_{ub}	3,096.66	กิโลจูล
			Q_{icp}	29,666.72	กิโลจูล
			Q_{sf}	919.61	กิโลจูล
			Q_{st}	5,033.91	กิโลจูล
			Q_{uf}	12,384.59	กิโลจูล
			Q_{ud}	6,499.75	กิโลจูล
รวม	58,322.20	กิโลจูล		58,322.20	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.3 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D225F21)
ตารางภาคผนวก ก.4 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

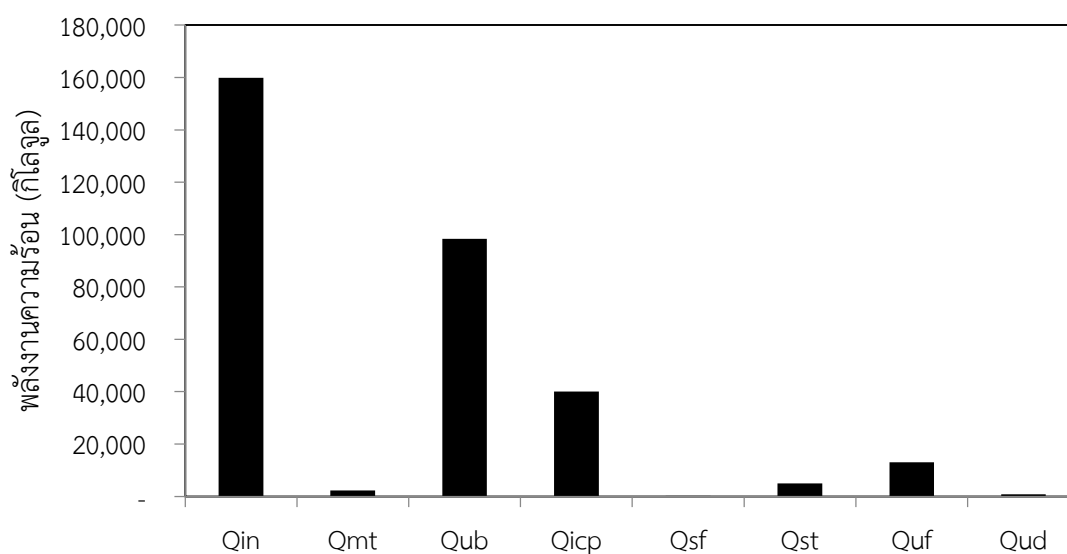
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ซีไต้	49,110.19	กิโลจูล	Q_{mt}	720.98	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	13,740.00	กิโลจูล	Q_{ub}	2,173.56	กิโลจูล
			Q_{icp}	29,668.35	กิโลจูล
			Q_{sf}	277.65	กิโลจูล
			Q_{st}	5,037.54	กิโลจูล
			Q_{uf}	13,804.03	กิโลจูล
			Q_{ud}	11,168.07	กิโลจูล
รวม	62,850.19	กิโลจูล		62,850.19	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.4 สมดุลความร้อนเตา 225 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
วินาที

กราฟสมดุลความร้อนของ เต้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที (D385F0)
ตารางภาคผนวก ก.5 สมดุลความร้อนเต้า 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที

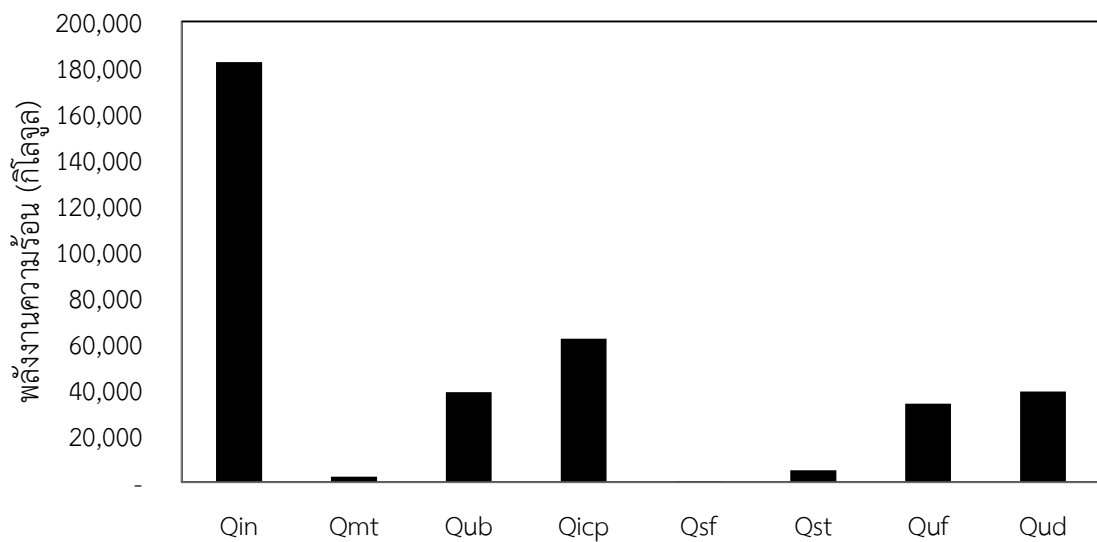
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	158,017.58	กิโลจูล	Q_{mt}	2,265.94	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	1,832.00	กิโลจูล	Q_{ub}	98,340.62	กิโลจูล
			Q_{icp}	40,036.92	กิโลจูล
			Q_{sf}	250.20	กิโลจูล
			Q_{st}	5,026.56	กิโลจูล
			Q_{uf}	13,096.01	กิโลจูล
			Q_{ud}	833.34	กิโลจูล
รวม	159,849.58	กิโลจูล		159,849.58	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.5 สมดุลความร้อนเต้า 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D385F7)
ตารางภาคผนวก ก.6 สมดุลความร้อนเตา 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

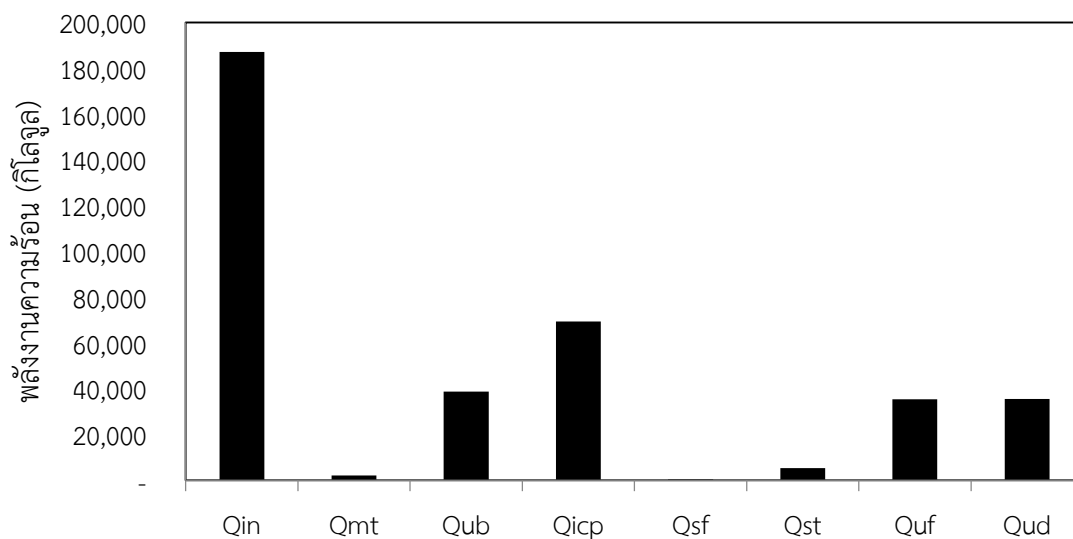
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	157,929.72	กิโลจูล	Q_{mt}	2,265.94	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	24,121.33	กิโลจูล	Q_{ub}	40,791.29	กิโลจูล
			Q_{icp}	65,410.18	กิโลจูล
			Q_{sf}	372.15	กิโลจูล
			Q_{st}	5,052.86	กิโลจูล
			Q_{uf}	28,192.69	กิโลจูล
			Q_{ud}	39,965.94	กิโลจูล
รวม	182,051.06	กิโลจูล		2,265.94	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.6 สมดุลความร้อนเตา 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
วินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D385F14)
ตารางภาคผนวก ก.7 สมดุลความร้อนเตา 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

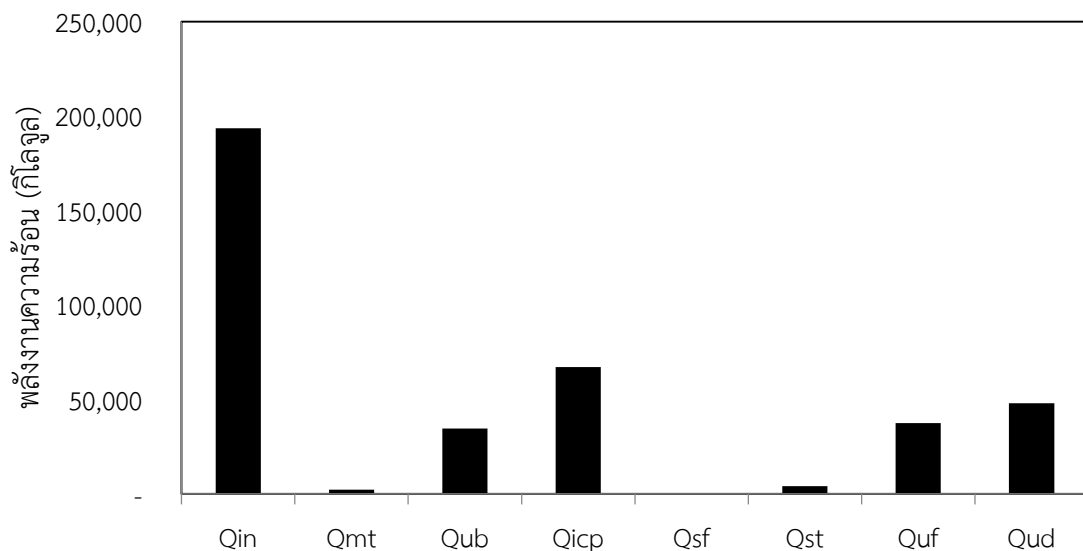
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	157,910.26	กิโลจูล	Q_{mt}	2,145.25	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	29,312.00	กิโลจูล	Q_{ub}	38,798.30	กิโลจูล
			Q_{icp}	69,447.04	กิโลจูล
			Q_{sf}	525.88	กิโลจูล
			Q_{st}	5,401.57	กิโลจูล
			Q_{uf}	35,378.99	กิโลจูล
			Q_{ud}	35,525.23	กิโลจูล
รวม	187,222.26	กิโลจูล		187,222.26	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.7 สมดุลความร้อนเตา 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
วินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D385F21)
ตารางภาคผนวก ก.8 สมดุลความร้อนเตา 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

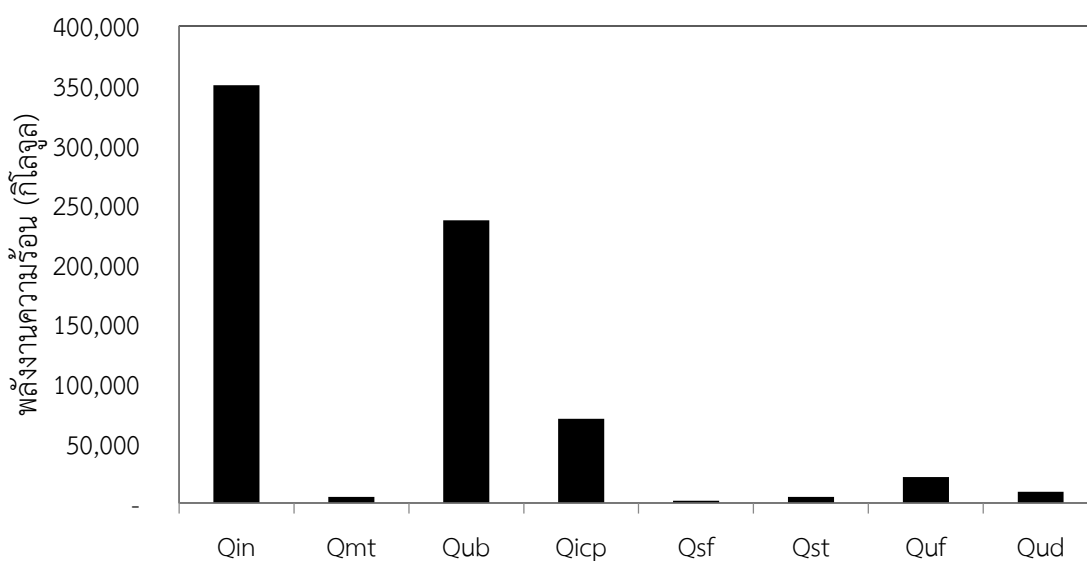
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	157,886.80	กิโลจูล	Q_{mt}	2,114.47	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	35,724.00	กิโลจูล	Q_{ub}	34,604.00	กิโลจูล
			Q_{icp}	67,161.96	กิโลจูล
			Q_{sf}	377.77	กิโลจูล
			Q_{st}	4,063.70	กิโลจูล
			Q_{uf}	37,357.95	กิโลจูล
			Q_{ud}	47,930.95	กิโลจูล
รวม	193,610.80	กิโลจูล		193,610.80	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.8 สมดุลความร้อนเตา 385 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
วินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที (D550F0)
ตารางภาคผนวก ก.9 สมดุลความร้อนเตา 550 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที

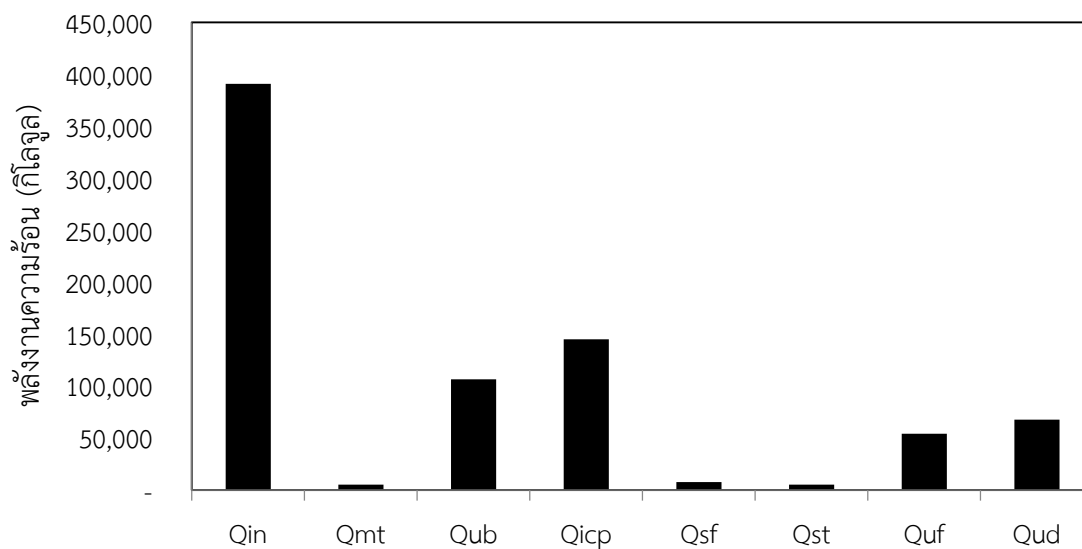
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	346,518.20	กิโลจูล	Q_{mt}	4,943.86	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	3,664.00	กิโลจูล	Q_{ub}	236,941.52	กิโลจูล
			Q_{icp}	70,559.83	กิโลจูล
			Q_{sf}	1,817.90	กิโลจูล
			Q_{st}	5,037.96	กิโลจูล
			Q_{uf}	21,550.64	กิโลจูล
			Q_{ud}	9,330.50	กิโลจูล
รวม	350,182.20	กิโลจูล		350,182.20	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.9 สมดุลความร้อนเตา 550 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที

กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D550F7)
ตารางภาคผนวก ก.10 สมดุลความร้อนเตา 550 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

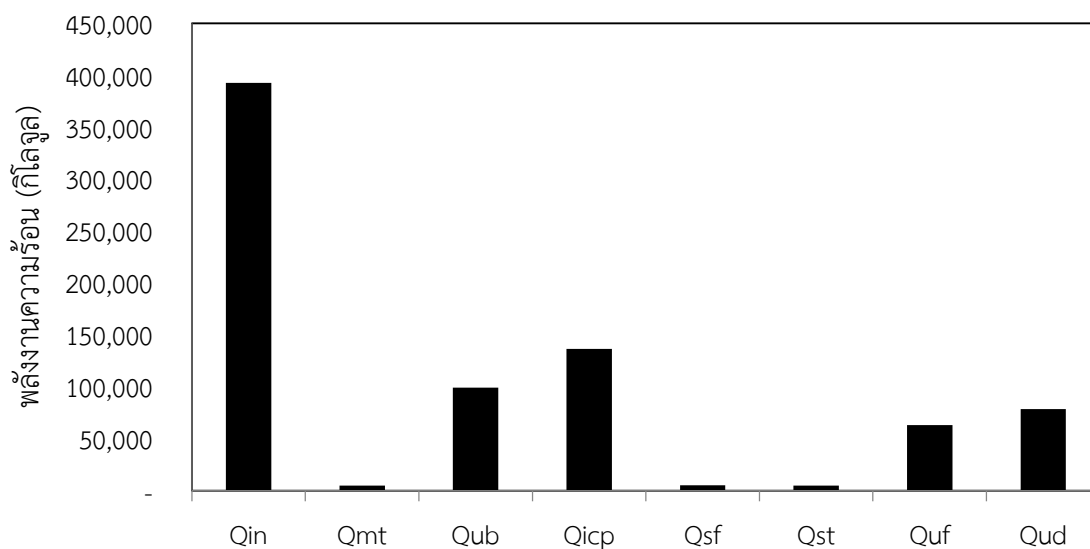
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ซีเลียม	356,032.68	กิโลจูล	Q_{mt}	5,079.82	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	34,808.00	กิโลจูล	Q_{ub}	106,626.38	กิโลจูล
			Q_{icp}	144,906.46	กิโลจูล
			Q_{sf}	7,502.99	กิโลจูล
			Q_{st}	5,041.05	กิโลจูล
			Q_{uf}	54,133.26	กิโลจูล
			Q_{ud}	67,550.72	กิโลจูล
รวม	390,840.68	กิโลจูล		390,840.68	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.10 สมดุลความร้อนเตา 550 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
วินาที

กราฟสมดุลความร้อนของ เต้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ที่อัตราไหลก๊าซ
 ไบโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D550F14)
 ตารางภาคผนวก ก.11 สมดุลความร้อนเต้า 550 อัตราไหลก๊าซไบโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัม
 ต่อวินาที

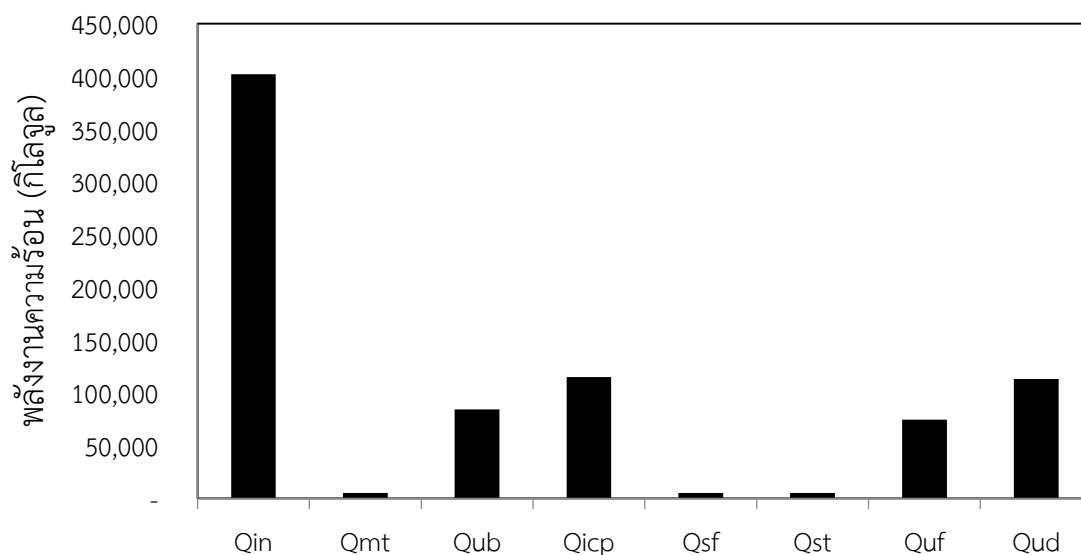
ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	346,440.77	กิโลจูล	Q_{mt}	4,943.86	กิโลจูล
ก๊าซไบโตรเลียมเหลว	46,258.00	กิโลจูล	Q_{ub}	99,181.95	กิโลจูล
			Q_{icp}	136,636.78	กิโลจูล
			Q_{sf}	5,140.81	กิโลจูล
			Q_{st}	5,049.55	กิโลจูล
			Q_{uf}	63,044.26	กิโลจูล
			Q_{ud}	78,701.55	กิโลจูล
รวม	392,698.77	กิโลจูล		392,698.77	กิโลจูล



รูปภาคผนวก ก.11 สมดุลความร้อนเต้า 550 อัตราไหลก๊าซไบโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
 วินาที

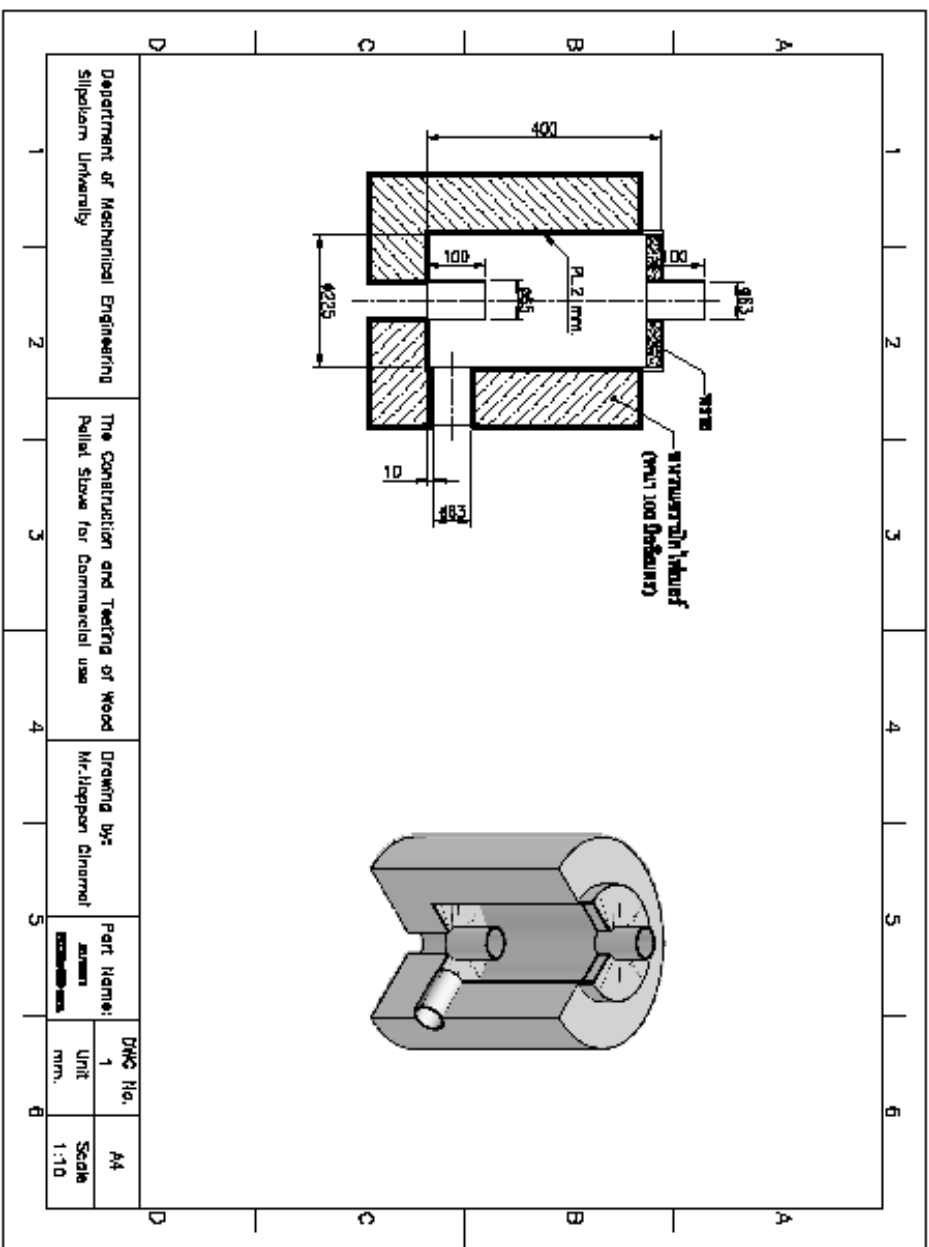
กราฟสมดุลความร้อนของเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อวินาที (D550F21)
ตารางภาคผนวก ก.12 สมดุลความร้อนเตา 550 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที

ความร้อนเข้า			ความร้อนออก		
ขี้เถ้า	346,424.07	กิโลจูล	Q_{mt}	4,943.86	กิโลจูล
ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	55,876.00	กิโลจูล	Q_{ub}	84,434.68	กิโลจูล
			Q_{icp}	114,950.00	กิโลจูล
			Q_{sf}	5,140.81	กิโลจูล
			Q_{st}	5,077.04	กิโลจูล
			Q_{uf}	74,471.00	กิโลจูล
			Q_{ud}	113,282.68	กิโลจูล
รวม	402,300.07	กิโลจูล		402,300.07	กิโลจูล

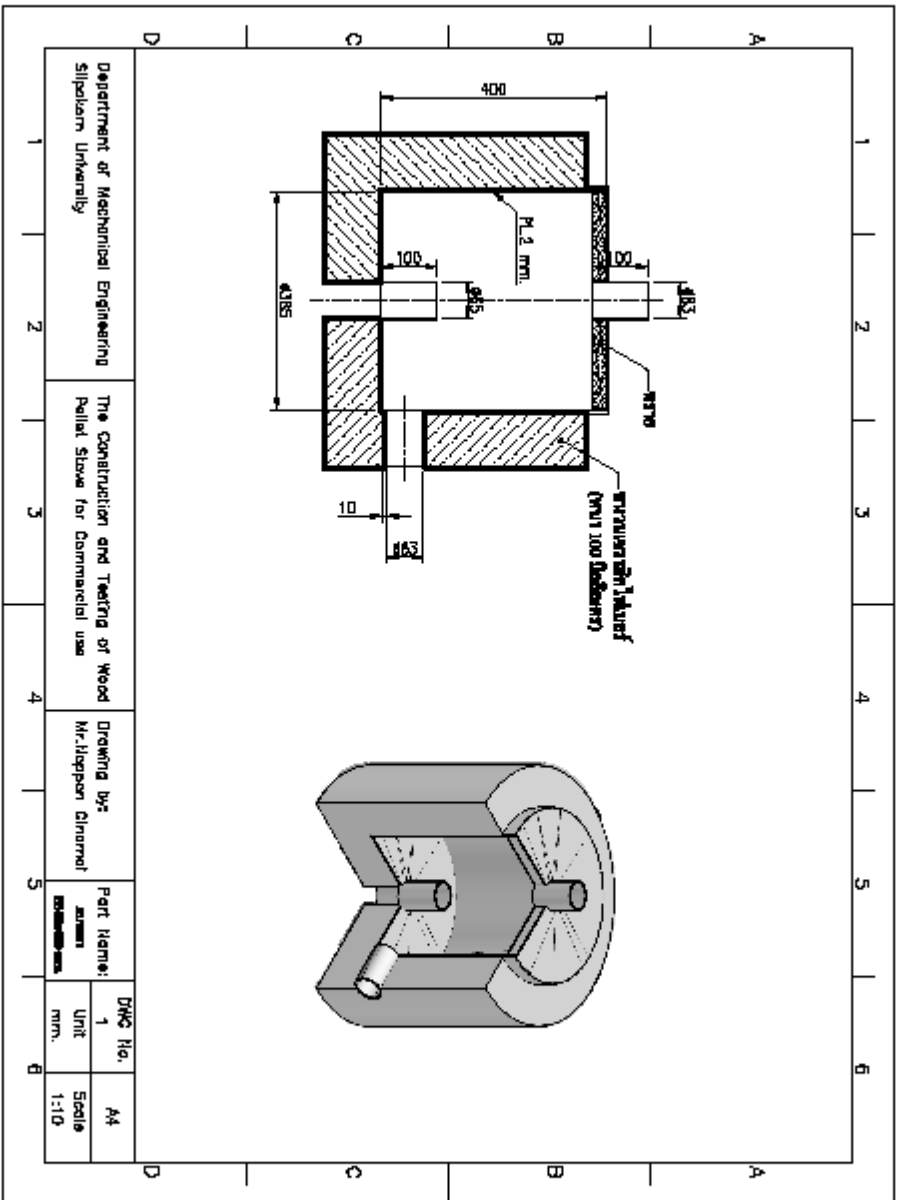


รูปภาคผนวก ก.12 สมดุลความร้อนเตา 550 อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.00×10^{-5} กิโลกรัมต่อ
วินาที

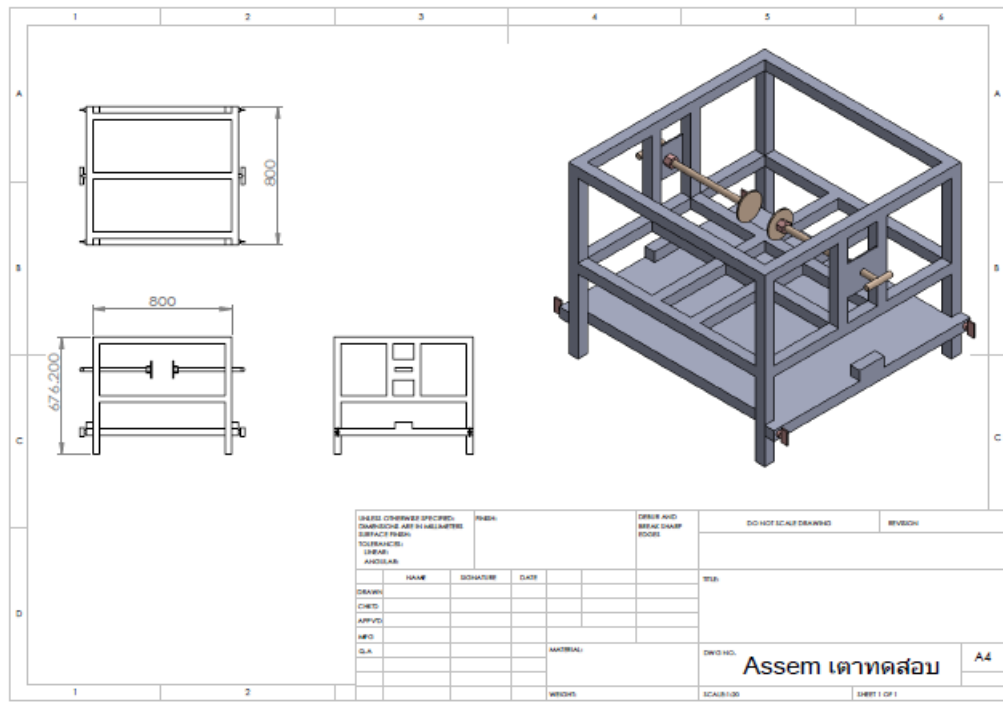




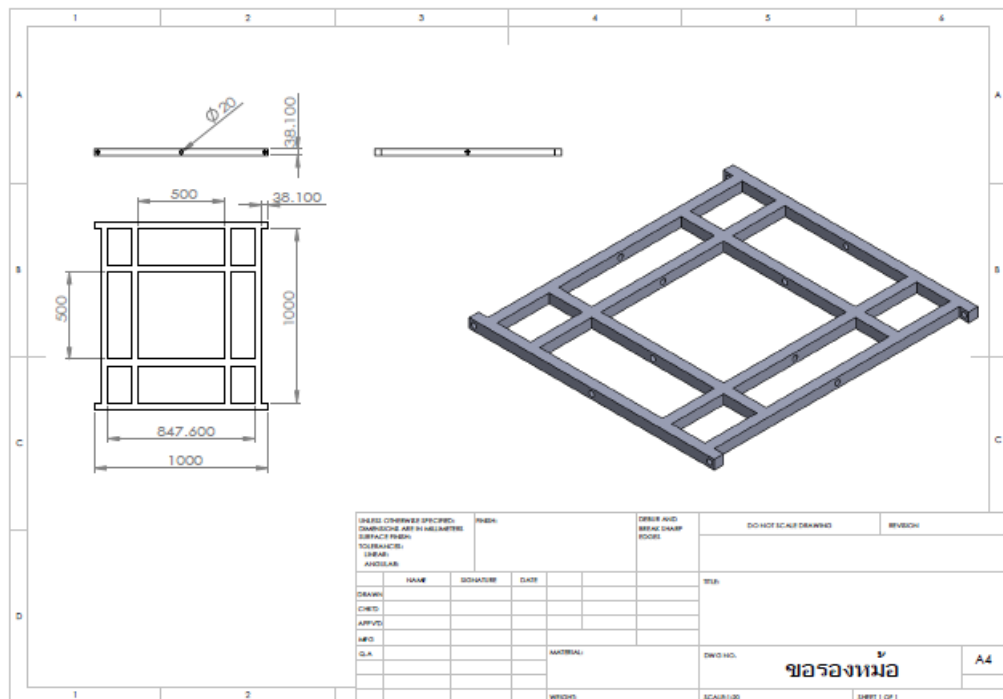
รูปภาคผนวก ข. 1 ตาเข่าร่วมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตร



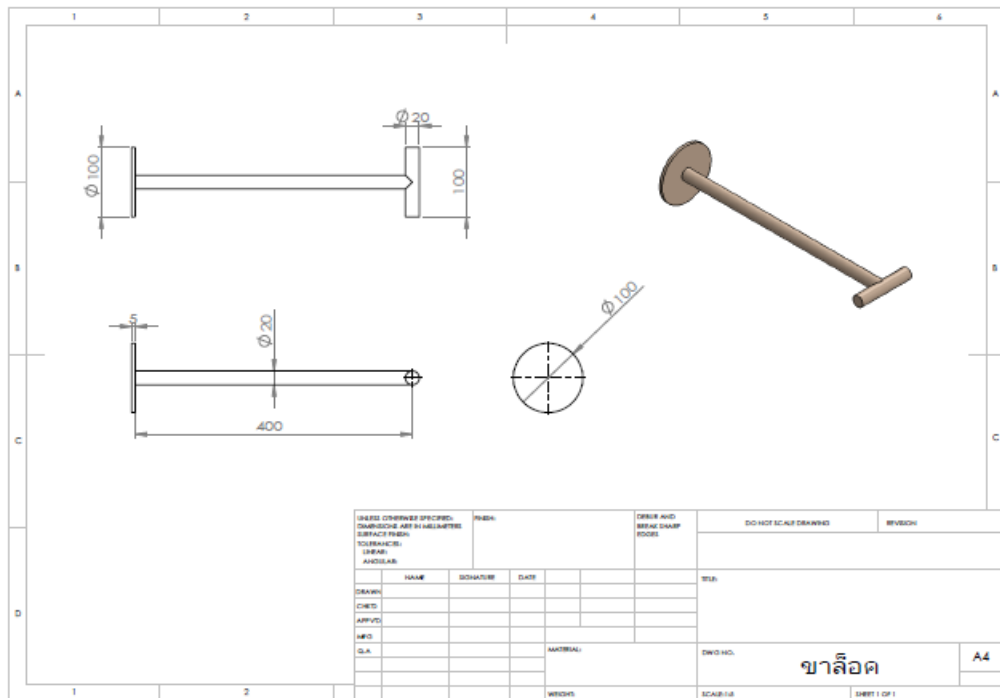
รูปภาพผนวก ข.2 เตาเผาร่วมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตร



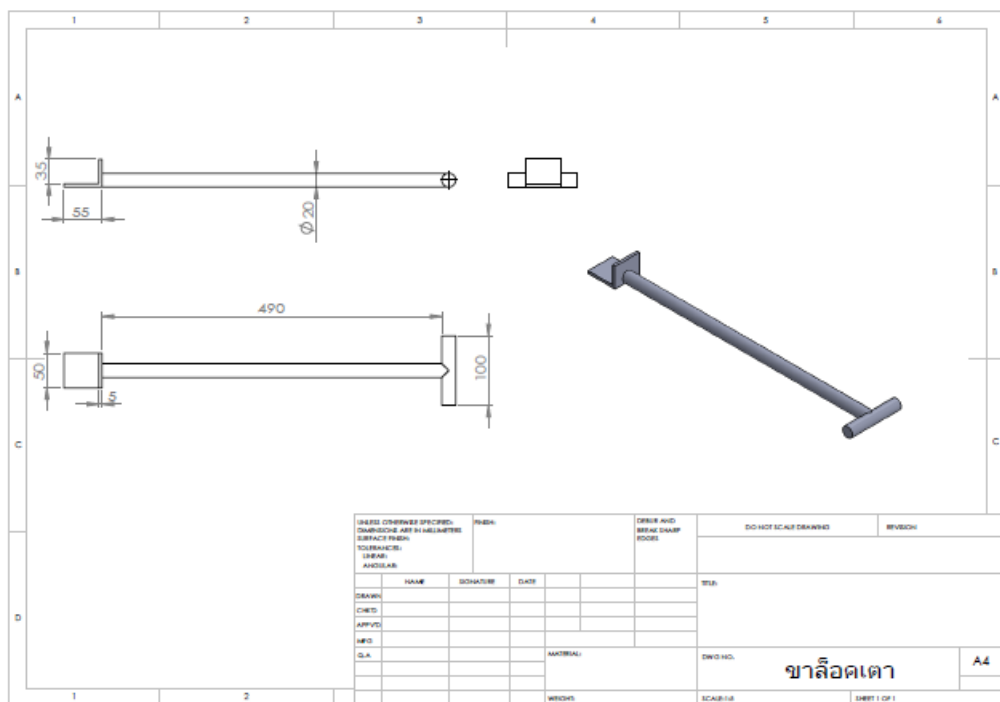
รูปภาคผนวก ข.4 แบบแท่นเตา



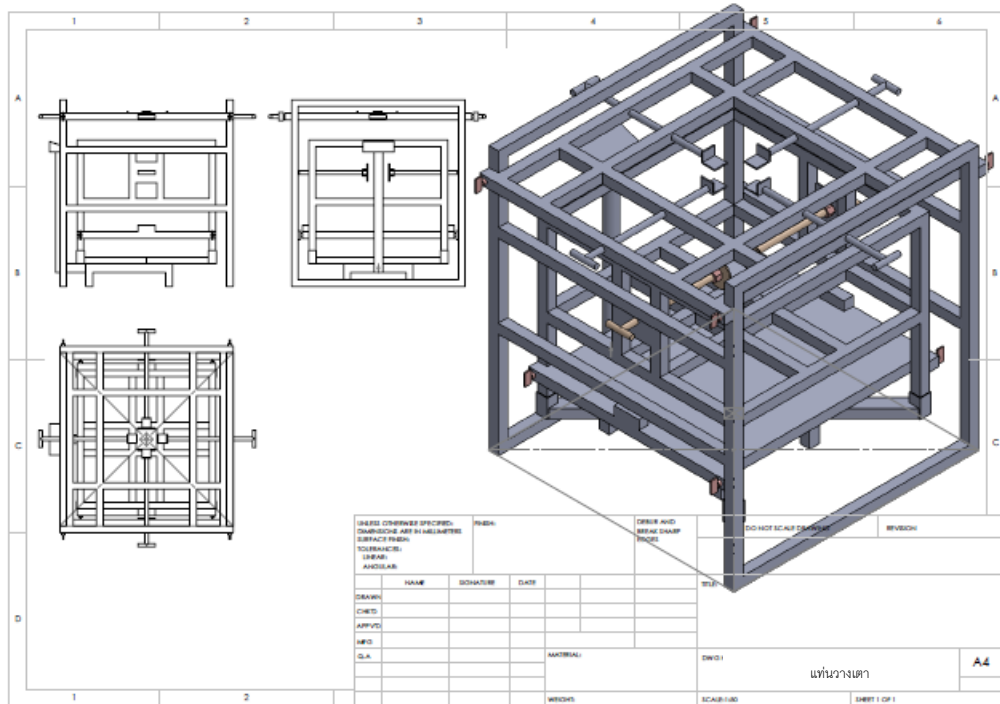
รูปภาคผนวก ข.5 แบบขอรองหม้อต้มน้ำ



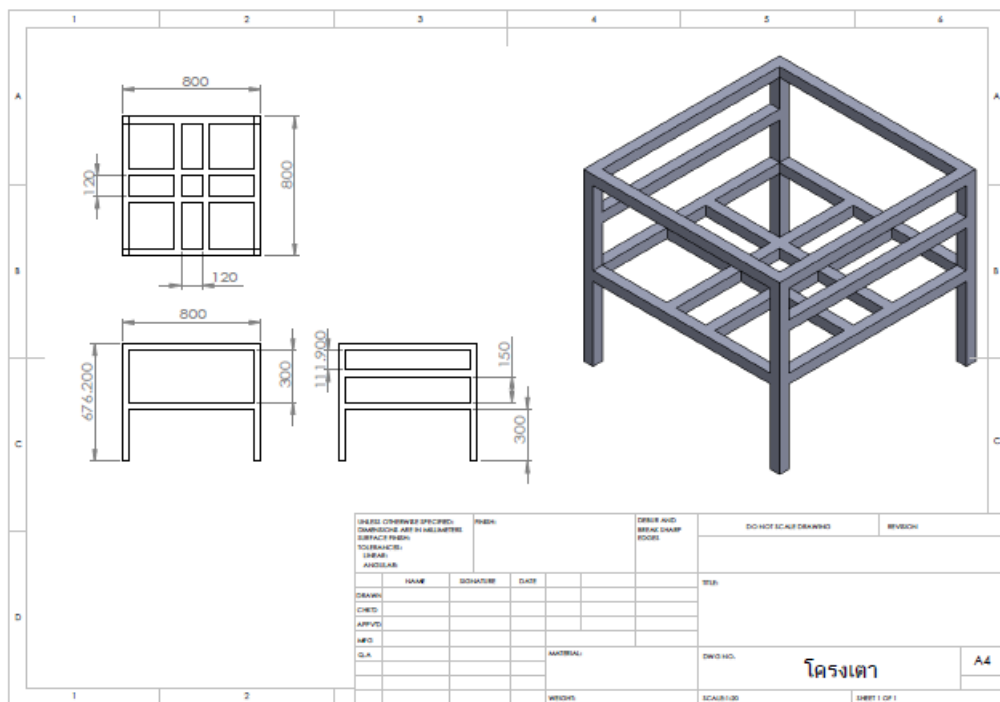
รูปภาคผนวก ข.6 แบบขาล็อค



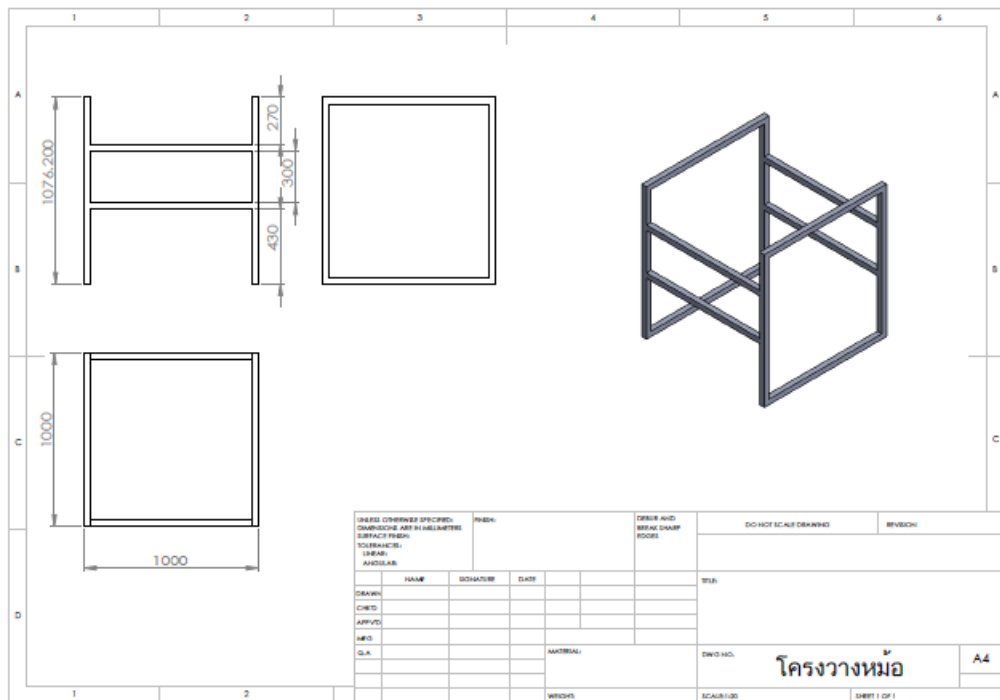
รูปภาคผนวก ข.7 แบบขาล็อคเตา



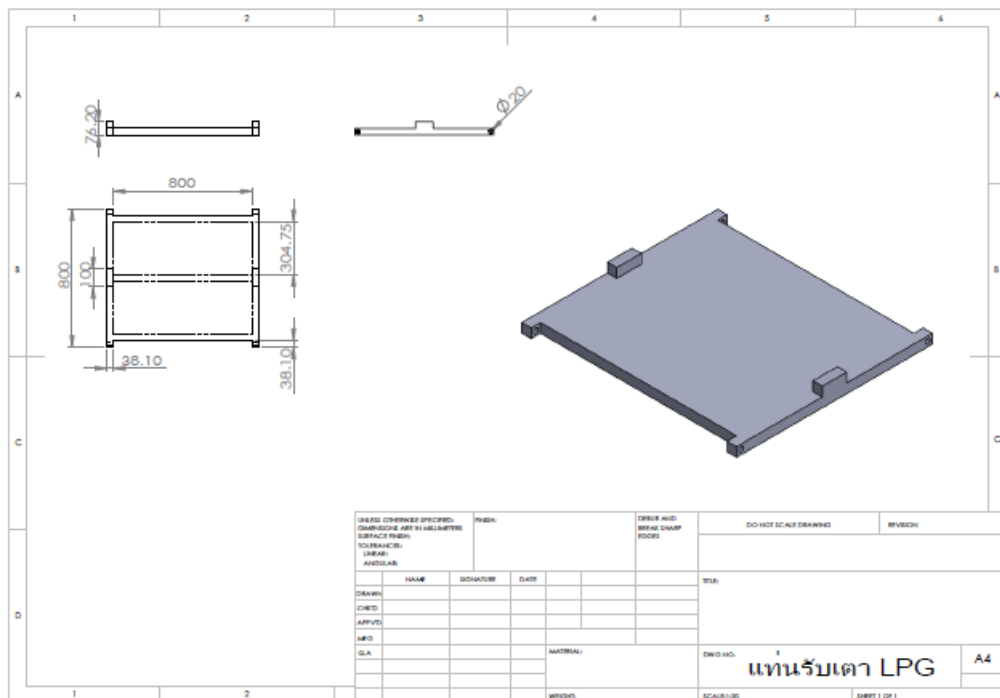
รูปภาคผนวก ข.8 แบบแท่นวางเตา



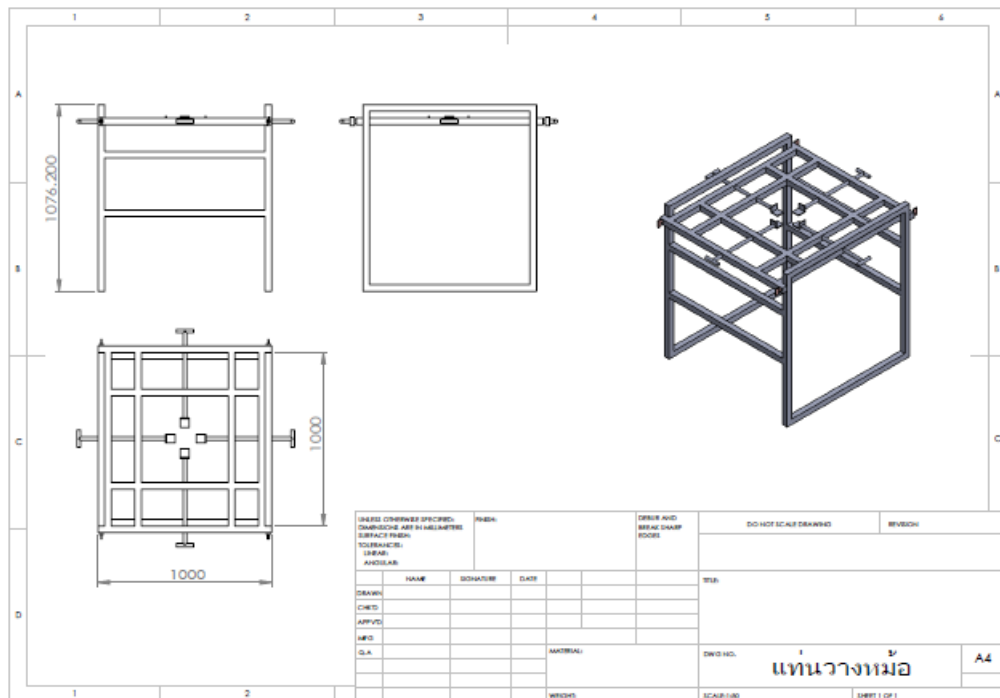
รูปภาคผนวก ข.9 แบบโครงเตา



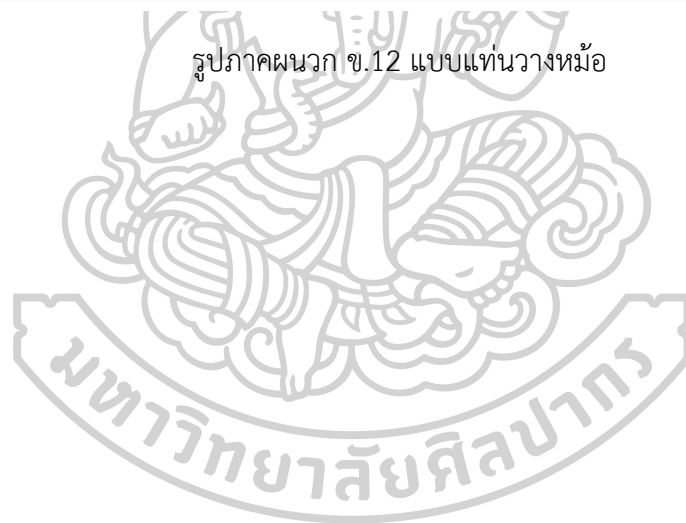
รูปภาคผนวก ข.10 แบบโครงวางหม้อ



รูปภาคผนวก ข.11 แบบแท่นรับเตา LPG



รูปภาคผนวก ข.12 แบบแท่นวางหม้อ





ภาคผนวก ค
รายการการคำนวณ

ค. ตัวอย่างการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้มีการคำนวณค่อนข้างมาก ซึ่งมีลักษณะเดียวกัน จึงยกตัวอย่างการคำนวณ 1 กรณี คือที่ปริมาณขี้เลื่อย 11 กิโลกรัม อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ค.1 สมดุลพลังงานของระบบ

ค.1.1 พลังงานความร้อนขาเข้า

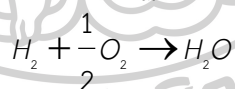
ค.1.1.1 พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงขี้เลื่อยและก๊าซปิโตรเลียมเหลว

พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้จากผลคูณของมวลของขี้เลื่อยอัดในเตากับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ใช้ และปริมาณความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ในกรณีทดลองของเตาขนาด 385 มิลลิเมตรใช้ขี้เลื่อยจำนวน 11 กิโลกรัมและใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวจำนวน 0.64 กิโลกรัม ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงนั้นสามารถหาได้ 2 วิธี คือ 1. ส่งวิเคราะห์ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง 2. คำนวณจากค่าการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์โดยละเอียดของเชื้อเพลิงนั้นๆ (proximate or ultimate analysis) ส่วนค่าความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลวใช้ค่า 45,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ตารางภาคผนวก ค.1 การวิเคราะห์โดยละเอียดของขี้เลื่อยอัดในภาชนะ

วัตถุดิบ	C	H	O	N	S	A	V	FC	HHV (kJ/kg)
ขี้เลื่อย	51.24	7.83	40.56014	0.368557	0.00945	0.42	81	18.58	14,500.00

ปริมาณไฮโดรเจนของขี้เลื่อยอัดในภาชนะ แสดงดังตารางผนวก ค.1 มีค่าเท่ากับ 7.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเท่ากับ 14.50 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณมวลน้ำในเชื้อเพลิงหาได้จากจากความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาด้านล่าง คือ



เมื่อพิจารณาให้ 2 กิโลกรัมของไฮโดรเจนนั้นสามารถผลิตไอน้ำได้ 18 กิโลกรัม มวลของไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัมคือ

2 กิโลกรัม H_2 ผลิตไอน้ำ 18 กิโลกรัม

$$0.0783 \text{ กิโลกรัม } H_2 \quad \text{ผลิตไอน้ำ} \quad \frac{0.0783 \text{ kg } H_2 \times 18 \text{ kg water vapor}}{2 \text{ kg } H_2}$$

$$= 0.7043$$

จะเห็นว่าเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม ส่งผลให้เกิดไอน้ำ 0.7043 กิโลกรัม จากค่าความร้อนแฝงของน้ำที่ความดันบรรยากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 2,257.2 กิโลจูลต่อกิโลกรัม จึงสามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ ค.1

$$LHV = HHV - h_{fg} \left(\frac{m_{water}}{m_f} \right) \quad (ค.1)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (กิโลจูล/กิโลกรัม)
 h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของน้ำที่ความดันบรรยากาศ (กิโลจูล/กิโลกรัม)
 m_{water} คือ มวลของน้ำในเชื้อเพลิง (กิโลกรัม)
 m_f คือ มวลของเชื้อเพลิง (กิโลกรัม)

จะได้ว่า
$$LHV = 14,500 \frac{kJ}{kg} - 2,257.2 kJ / kg \left(\frac{0.7043 kg}{11 kg} \right)$$

$$LHV = 14,355.5 kJ / kg$$

เมื่อได้ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (LHV) แล้วนั้น จึงสามารถหาค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง ได้จากสมการที่ ค.2 คือ

$$Q_r = m_f \times LHV \quad (ค.2)$$

เมื่อ m_f คือ มวลเชื้อเพลิงที่ป้อน (กิโลกรัม)
 LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (กิโลจูล/กิโลกรัม)
 Q_r คือ ความร้อนจากเชื้อเพลิง (กิโลจูล)

จะได้ว่า
$$Q_r = 11 kg \times 14,355.5 kJ / kg$$

$$Q_r = 157,910.3 kJ$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงสำหรับที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 157,910.3 กิโลจูล

ค่าความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ได้จาก ค่าความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลวคูณด้วยปริมาณที่ใช้

$$Q_{LPG} = HHV_{LPG} \times m_{LPG} \text{ kJ/kg}$$

$$\text{แทนค่าในสูตร } Q_{LPG} = 45,800 \times 0.64$$

$$= 29,312 \text{ kJ}$$

$$\text{รวมความร้อนเข้าทั้งหมด} = 157,910.3 + 29,312 = 187,222.3 \text{ กิโลจูล}$$

ค.1.2 พลังงานความร้อนขาออก

ค.1.2.1 พลังงานความร้อนสูญเสีย

ค.1.2.1.1 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดจากการเผาไหม้แล้วได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เกิดขึ้นแทนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้คาร์บอน 1 กิโลกรัมของเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะมีค่าเท่ากับ 33,800 กิโลจูลต่อกิโลกรัม แต่หากในการเผาไหม้นั้นไม่สมบูรณ์จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์แทนที่

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 10,120 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เกิดการสูญเสียไปกับการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นี้จึงมีค่าเท่ากับ 23,680 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ดังนั้นเพื่อตรวจสอบว่ามีพลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในทดลองนั้น จึงได้ทำการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน ด้วยเครื่อง Fyrite Gas Analyzers พบว่ามีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน เท่ากับ 5.71 และ 12.93 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับดังที่แสดงในตาราง ค.1 และนำค่าที่ได้จากการทดสอบนี้มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าการวิเคราะห์ ultimate ของเชื้อเพลิง ดังตาราง ค.3

ตารางภาคผนวก ค.2 ค่าเฉลี่ยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ
1	10 min	12.5	8	233
2	50 min	12.5	7	102
3	1.3 h	12	5	123
4	2.1 h	15	4	154
5	2.5 h	14	5	102
6	3.3 h	10.5	7	118
7	4.1 h	14	4	122
เฉลี่ย		12.93	5.71	136.29

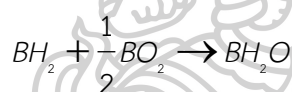
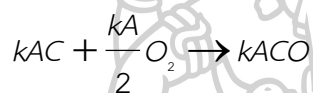
ขั้นตอนในการวิเคราะห์ kmol ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเผาไหม้เริ่มจากกำหนดให้เชื้อเพลิงใน 1 kmol มีองค์ประกอบของธาตุ C, H₂, O₂, N₂ และ S ดังนี้ C = A kmol, H₂ = B kmol, O₂ = D kmol, N₂ = E kmol และ S = F kmol Fraction ที่ตรวจวัดได้ในผลิตภัณฑ์ของปริมาณออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้ ; O₂ = G และ CO₂ = I

ตารางภาคผนวก ค.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุตามการวิเคราะห์ ultimate ของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของ เชื้อเพลิงผสม	C (A)	H ₂ (B)	O ₂ (D)	N ₂ (E)	S (F)	รวม
ปริมาณโดยน้ำหนัก	51.24	7.83	40.56	0.37	0.009	100.0
น้ำหนักโมเลกุล	12.01	2.016	31.999	28.013	32.06	-
kMole ต่อ 100 kg	4.27	3.88	1.27	0.01	0.00029	9.43
เปอร์เซ็นต์โดยโมล	0.4525	0.4117	0.1344	0.0014	3.12×10^{-5}	1

จากตารางผนวก ค.1 จะพบว่า kmol รวมของซีลี้อยัดในภาชนะ จำนวน 11 กิโลกรัม สามารถหาได้จากการการเทียบบัญญัติโดยตรงกับจำนวน kmol รวมของซีลี้อยัดในภาชนะต่อ 100 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 0.76 จากนั้นนำองค์ประกอบของธาตุที่มีในตัวซีลี้อยัดในภาชนะเขียนสมดุลสมการเคมี เพื่อดูปริมาณของ kmol ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ดังสมการด้านล่าง

ปฏิกิริยาเคมี



จำนวนโมล O₂ ที่ต้องการใช้ในปฏิกิริยาเคมี $= \frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B + F$

ในเชื้อเพลิง 1 kmol มี O₂ อยู่แล้ว $= D$

ดังนั้นต้องดูด O₂ จากอากาศ $= \frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B + F - D$

จะได้ว่า จะมี N₂ ติดมากับอากาศ $= 3.76 \left[\frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B + F - D \right]$

วิเคราะห์จำนวน kmol ของผลิตภัณฑ์ได้ดังต่อไปนี้

$$N_2 = E + 3.76 \left[\frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B + F - D \right] \quad (\text{ค.3})$$

$$O_2 = \beta \quad (\text{ค.4})$$

$$CO = kA \quad (\text{ค.5})$$

$$CO_2 = (1-k)A \quad (\text{ค.6})$$

$$H_2O = B \quad (\text{ค.7})$$

$$SO_2 = F \quad (\text{ค.8})$$

จำนวน kmol รวม

$$\begin{aligned} &= \beta + E + 3.76 \frac{kA}{2} + 3.76A - 3.76kA - 3.76D + kA + A - kA + B + F + \frac{3.76}{2}B + 3.76FS \\ &= \\ &\left[\frac{3.76}{2}k - 3.76k \right]A + [3.76 + 1]A + \left[\frac{3.76}{2} + 1 \right]B - [3.76]D + E + [3.76 + 1]F + \beta \\ &= (-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta \quad (\text{ค.9}) \end{aligned}$$

สัดส่วน O_2 ในผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} G &= \beta / [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta] \\ \beta &= G [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta] \\ \beta &= \frac{G [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F]}{1 - G} \quad (\text{ค.10}) \end{aligned}$$

$$\text{และ } I = (1 - k)A / [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]$$

$$(1 - k)A = I(-1.88kA) + 4.76IA + I[2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]$$

$$I(-1.88kA) + kA = A - I[4.76A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]$$

$$k = \frac{A - I[4.76A + 2.88B - 3.76D + E + 4.76F + \beta]}{A[-1.88I + 1]} \quad (\text{ค.11})$$

จำนวน kmol ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากทำการเผาไหม้ต่อ 1 kmol ของเชื้อเพลิงที่ปริมาณ
ซีลี้อย 11 กิโลกรัม อัตราไหลก๊าซป้อนเฉลี่ยมวล 3.33×10^{-5} ได้จากสมการที่ ค.3 - ค.8

ตารางภาคผนวก ค.4 จำนวนกิโลกรัมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ที่การป้อนเชื้อเพลิงที่ปริมาณ
เชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5}

Total Product (kMole)	(kMole)/ 1 kmol fuel	(kMole)/ n kmol fuel	kmol _i /kmol _{total}	กิโลกรัม/kmol _i	กิโลกรัม _i
	2.60	2.85	1	-	27.86
CO	0.30	0.33	0.12	28.01	3.28
CO ₂	0.15	0.16	0.06	44.01	2.51
H ₂ O	0.41	0.45	0.16	18.00	2.85
SO ₂	0.00	0.00	0.00	64.06	0.00
O ₂	0.34	0.37	0.13	32.00	4.14
N ₂	1.40	1.54	0.54	28.01	15.08

ดังนั้น เเปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ได้มาจากการนำสัดส่วนของจำนวน kmol
ของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์หารด้วย kmol รวมของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดคูณ 100 มีค่าเท่ากับ 11.54
จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังสมการที่
ค.12

$$Q_{kp} = \frac{CO \times C_r}{CO_2 + CO} \times m \times 23,680 \text{ kJ / kg} \quad (\text{ค.12})$$

เมื่อ CO, CO₂ คือ % โดยปริมาตรของไอเสีย

C_r คือ สัดส่วนของคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม

Q_{kp} คือ ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (กิโลจูล)

จะได้ว่า

$$Q_{kp} = \frac{11.70 \times 0.51}{11.70 + 5.71} \times 8.52 \times 23,680 \text{ kJ / kg}$$

เมื่อเชื้อเพลิงเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ จะได้ว่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผา
ไหม้ไม่สมบูรณ์มีค่าเท่ากับ

$$Q_{kp} = 69,447.04 \text{ กิโลจูล}$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่ 11 กิโลกรัม
มีค่าเท่ากับ 69,447.04 กิโลจูล

ค.1.2.1.2 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่หมด

การสูญเสียในกรณีนี้เกิดกับเชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น คือเมื่อเชื้อเพลิงแข็งเกิดการสันดาป ขนาดของมวลจะมีขนาดเล็กลง เช่นนั้นถ้าเล็กมากก็จะตกตะแกรงของเตาลงสู่ก้นเตา กลายเป็นขี้เถ้า ทำให้เชื้อเพลิงถ่ายเทความร้อนได้เต็มที่ หาได้จากสมการที่ ค.13

$$Q_{ub} = (33,800 \times m_r) \times C_r \quad (\text{ค.13})$$

เมื่อ m_r คือ มวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดปราศจาก ash (กิโลกรัม)
 C_r คือ สัดส่วนของคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม
 Q_{ub} คือ ความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด (กิโลจูล)

เมื่อปริมาณเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดหลังเสร็จสิ้นกระบวนการมีค่าเท่ากับ 2.48 กิโลกรัม เปอร์เซ็นต์ความชื้นในชีวมวลนี้หาได้จาก ASTM E 871-82 มีค่าเท่ากับ 7.8 เปอร์เซ็นต์ จะได้ว่ามวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดปราศจากความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.27 กิโลกรัม จากนั้นทำการหาปริมาณ ash ในมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดปราศจากความชื้น โดยการทดสอบหาปริมาณ ash จะเป็นไปตาม ASTM E1102 มีค่าเท่ากับ 93.70 เปอร์เซ็นต์โดยมวล คิดเป็นมวล ash ในเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมดปราศจากความชื้น เป็น 0.25 กิโลกรัม ดังนั้นมวลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดปราศจาก ash จึงมีค่าเท่ากับมวลเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมดเริ่มต้นหักด้วยมวล ash ในเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมดปราศจากความชื้น มีค่าเท่ากับ 0.03 กิโลกรัม ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่หมดจึงมีค่าเท่ากับ

$$Q_{ub} = 33,800 \text{ kJ / kg} \times 2.24 \text{ kg} \times 0.5124$$

$$Q_{ub} = 38,798.3 \text{ กิโลจูล}$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่หมดสำหรับที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 38,798.3 กิโลจูล

ค.1.2.1.3 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง

ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความชื้นนี้มาจากผลรวมของความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และความร้อนแฝง (Latent heat)

ค.1.2.1.3.1 ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนสัมผัส

ความร้อนสัมผัสของการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดในภาชนะนั้นขึ้นอยู่กับความชื้นที่มีอยู่ในตัวเชื้อเพลิงเริ่มต้น ดังแสดงในสมการที่ ค.14

$$\dot{Q}_{mt, sb_i} = \frac{\dot{m}_{H_2O, flue}}{M_{H_2O}} \int_{T_a}^{T_r} \bar{C}_{p, H_2O} dT \quad (\text{ค.14})$$

เมื่อ $\dot{m}_{H_2O, flue}$ คือ อัตราการไหลของไอน้ำเมื่อเกิดการเผาไหม้ (กิโลกรัม/วินาที)

M_{H_2O} คือ น้ำหนักโมเลกุลของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 18.015 กิโลกรัม/kmol

\bar{C}_{p, H_2O} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ อ้างอิงจาก Table A.13[1]

\dot{Q}_{mt, sb_i} คือ อัตราพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนสัมผัสที่วินาทีที่ i (กิโลจูล/วินาที)

ในกรณีนี้ เมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงนั้นมีค่าเท่ากับ 7.8 เปอร์เซ็นต์ ซีลี้อยัดในภาชนะที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการจำนวน 11 กิโลกรัม และระยะเวลาที่ดำเนินการเผาไหม้เท่ากับ 15,000 วินาที จะสามารถหาอัตราการไหลของไอน้ำเมื่อเกิดการเผาไหม้ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{H_2O, fuel} = \frac{11 \text{ kg fuel} \times 7.8}{15,000 \text{ s} \times 100}$$

$$\dot{m}_{H_2O, fuel} = 5.72 \times 10^{-5} \text{ kg / s}$$

สมมติให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของการทดลองมีค่าเท่ากับ 25 °C หรือที่ 298.15 K เพื่อให้ง่ายในการใช้ตาราง A.13 และอุณหภูมิของไอเสียเฉลี่ยแต่ละด้านได้จากการทดลอง โดยทำการตรวจวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิที่ได้ทุกๆ 1 วินาที ด้วยเครื่อง midi LOGGER GL 820 และ เครื่อง midi LOGGER GL 220 จึงสามารถคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ณ ช่วงเวลานั้นๆ ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณในวินาทีที่ 1 ของการทดลองดังนี้

$$\dot{Q}_{mt, sb_1} = \frac{5.72 \times 10^{-5} \text{ kg / s}}{18.015 \text{ kg / kmol}} \times (103.2206667 - 4.65) \text{ kJ / kmol}$$

$$\dot{Q}_{mt, sb_1} = 0.00038505 \text{ kJ / s}$$

จากนั้นทำการคำนวณทุกๆ วินาทีตลอดการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ดำเนินการทดลองจำนวน 15,000 วินาทีดังที่กล่าวข้างต้น ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนสัมผัสรวมจึงมีค่าเท่ากับ

$$Q_{mt, sb} = \sum_{i=1}^{17,100} (\dot{Q}_{mt, sb_i})$$

$$Q_{mt, sb} = 208.58 \text{ kJ}$$

เมื่อ $Q_{mt, sb}$ คือ ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนสัมผัส (กิโลจูล)

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนสัมผัสรวมสำหรับที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 208.58 กิโลจูล

ค.1.2.1.3.2 ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนแฝง
ความร้อนแฝงที่กล่าวนี้จะเปลี่ยนเฟสน้ำในชีวมวลจากของเหลวกลายเป็นไอ ดังแสดงในสมการที่ ค.15

$$Q_{mt, it} = 2257.2 \text{ kJ / kg} \times M_w \quad (\text{ค.15})$$

เมื่อ M_w คือ ปริมาณความชื้นรวม (กิโลกรัม)

$Q_{mt, it}$ คือ ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนแฝง (กิโลจูล)

เมื่อปริมาณความชื้นรวมของซีลี้อยัดในภาชนะมีค่าเท่ากับ 0.8064 กิโลกรัมจะได้ว่าค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนแฝงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.48 กิโลกรัม/hr มีค่าเท่ากับ

$$Q_{rnt,lt} = 2257.2 \text{ kJ / kg} \times 0.858 \text{ kg}$$

$$Q_{rnt,lt} = 1,936.68 \text{ kJ}$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนแฝงสำหรับที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 1,936.68 กิโลจูล ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากความชื้นของเชื้อเพลิงซึ่งมาจากผลรวมของความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และความร้อนแฝง (Latent heat) จึงมีค่าเท่ากับ 1,936.68 กิโลจูล

ค.1.2.1.4 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนัง

การสูญเสียความร้อนที่ผิวผนังของระบบนี้มี 2 รูปแบบคือ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน และการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน ดังแสดงในสมการที่ ค.16

$$Q_{sf} = \sum_{i=1}^{17,100} h A_s (T_{s,i} - T_\alpha) + \sum_{i=1}^{17,100} \epsilon A_s \sigma (T_{s,i}^4 - T_\alpha^4) \quad (\text{ค.16})$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2\text{C}$)

A_s คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับการไหล (m^2)

$T_{s,i}$ คือ อุณหภูมิไอเสียที่อุณหภูมิ (K)

T_α คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

ϵ คือ ค่าการแผ่รังสี emissivity มีค่าเท่ากับ 0.77

σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

การคำนวณการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนนั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ค.16 โดยพื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับการไหลนั้นแสดงดังรายละเอียดในตารางผนวก ค.4 การแลกเปลี่ยนความร้อนมีทั้งหมด 6 ด้าน คือ ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวาของชุดให้ความร้อน ส่วนการคำนวณการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนนั้น จะมีรายละเอียดการคำนวณเพิ่มเติม ดังสมการที่ ค.17 -ค.20 การคำนวณหาค่า h ของผนังภายนอกเตาในแต่ละด้านตั้งนี้โดยการหาค่าสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิฟิล์ม (Film temperature, $T_{f,i} = (T_{s,i} + T_\alpha)/2$) การคำนวณการสูญเสียทั้งสองอย่างนี้จะคำนวณทุกๆวินาที โดยค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนังจะเกินจากผลรวมจากวินาทีที่ 1 ถึงวินาทีที่ 15,000 ของการคำนวณความร้อนสูญเสียทั้งสอง

ตารางภาคผนวก ค.5 แสดงพื้นที่ผิวผนังในการแลกเปลี่ยนความร้อน

ตำแหน่งผนัง	พื้นที่ผิวผนัง, A_s (m^2)	ความสูงของผนัง, L_c (m)
A1	0.178	0.2
A2	0.178	0.2
A3	0.178	0.2
A4	0.0785	0.08125
A5	0.0785	0.08125

การหาค่าเรย์ลี (Rayleigh number)แสดงดังสมการที่ ค.17

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\alpha)L_c^3 Pr}{\nu^2} \quad (\text{ค.17})$$

- เมื่อ
- Ra คือ Rayleigh number
 - g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 0.98 (m/s^2)
 - β คือ volumetric thermal expansion coefficient $1/(T_s + T_\alpha)$ (K^{-1})
 - T_s คือ อุณหภูมิผิวชุดให้ความร้อนแก่กระบวนการไพโรไลซิส(K)
 - T_α คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)
 - L_c คือ ความสูงของชุดให้ความร้อนแก่กระบวนการไพโรไลซิส (m)
 - Pr คือ Prandal number
 - ν คือ kinematic viscosity (m^2/s)

ค่านัสเซสซันมเบอร์ (Nusselt number) แสดงดังสมการที่ ค.18 และ ค.19

$$Nu = 0.59Ra^{1/4}; (Ra < 10^9) \quad (\text{ค.18})$$

$$Nu = 0.1Ra^{1/3}; (10^{10} < Ra < 10^{13}) \quad (\text{ค.19})$$

เมื่อ Nu คือ Nusselt number

จากนั้น สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ได้ดังสมการที่ 20

$$h = \frac{Nu \times k}{L_c} \quad (\text{ค.20})$$

เมื่อ h คือ Thermal Conductivity ($W/m^2\text{°C}$)

ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนังแต่ละด้านเนื่องจากการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนนั้นจึงสามารถสรุปได้ดังตาราง ค.6

ตารางภาคผนวก ค.6 แสดงสรุปค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียความร้อนที่ผิวผนัง

ทิศของผิวผนัง	Q_{conv} (กิโลจูล)	Q_{rad} (กิโลจูล)
A1	3.71	6.49
A2	6.23	11.00
A3	11.15	17.86
A4	244.94	218.63
A5	2.29	3.58
รวม	268.31	257.57

จึงสรุปได้ว่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนังสำหรับปริมาณเชื้อเพลิง 11 กิโลกรัม อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} มีค่าเท่ากับ $268.31 + 257.57 = 525.88$ กิโลจูล

ค.1.2.1.5 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสีย

พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียนั้น สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบไอเสีย เมื่อทราบว่าก๊าซไอเสียที่ไหลออกมาทางปากปล่องนั้นประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้สมการที่ ค.21

$$\dot{Q}_{st_1} = \frac{\dot{m}_{H_2O, flue}}{M_{H_2O}} \int_{T_a}^{T_c} \bar{C}_{p, H_2O} dT + \frac{\dot{m}_{CO_2, flue}}{M_{CO_2}} \int_{T_a}^{T_c} \bar{C}_{p, CO_2} dT + \frac{\dot{m}_{CO, flue}}{M_{CO}} \int_{T_a}^{T_c} \bar{C}_{p, CO} dT + \frac{\dot{m}_{O_2, flue}}{M_{O_2}} \int_{T_a}^{T_c} \bar{C}_{p, O_2} dT + \frac{\dot{m}_{N_2, flue}}{M_{N_2}} \int_{T_a}^{T_c} \bar{C}_{p, N_2} dT \quad (\text{ค.21})$$

เมื่อ	$\dot{m}_{H_2O, flue}$	คือ อัตราการไหลของไอน้ำเมื่อเกิดการเผาไหม้ (กิโลกรัม/s)
	M_{H_2O}	คือ น้ำหนักโมเลกุลของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 18.015 กิโลกรัม/kmol
	\bar{C}_{p, H_2O}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ อ้างอิงจาก Table A.13 [1]
	$\dot{m}_{CO_2, flue}$	คือ อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้ (กิโลกรัม/s)
	M_{CO_2}	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 44.009 กิโลกรัม/kmol
	\bar{C}_{p, CO_2}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อ้างอิงจาก Table A.13
	$\dot{m}_{CO, flue}$	คือ อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้ (กิโลกรัม/s)
	M_{CO}	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีค่าเท่ากับ 28.0098 กิโลกรัม/kmol
	$\bar{C}_{p, CO}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อ้างอิงจาก Table A.13 [1]
	$\dot{m}_{O_2, flue}$	คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้ (กิโลกรัม/s)
	M_{O_2}	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 31.999 กิโลกรัม/kmol
	\bar{C}_{p, O_2}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน อ้างอิงจาก Table A.13 [1]
	$\dot{m}_{N_2, flue}$	คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้ (กิโลกรัม/s)
	M_{N_2}	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 กิโลกรัม/kmol
	\bar{C}_{p, N_2}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน อ้างอิงจาก Table A.13 [1]
	\dot{Q}_{st_i}	คือ อัตราพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียที่วินาทีที่ i (กิโลจูล/s)

อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย ที่ปริมาณซึ่งเล็ย 11 กิโลกรัม อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} พบว่าอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.000167, 0.000218, 0.000276, 0.001005 และ 0.000190 กิโลกรัม/วินาที ตามลำดับ

เมื่อสมมติให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของการทดลองมีค่าเท่ากับ 25 °C หรือที่ 298.15 K เพื่อให้ง่ายในการใช้ตาราง A.13 และอุณหภูมิของไอเสียเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง โดยทำการตรวจวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิที่ได้ทุกๆ 1 วินาที ด้วยเครื่อง midi LOGGER GL 820 และ เครื่อง midi LOGGER GL 220 จึงสามารถคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ณ ช่วงเวลานั้นๆ ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณในวินาทีที่ 1 ของการทดลองดังนี้

$$Q_{st_1} = \frac{0.000167 \text{ kg} / \text{s}}{44.009 \text{ kg} / \text{kmol}} \times (22,891,231.25 - 5.175) \text{ kJ} / \text{kmol}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{0.000218 \text{ kg / s}}{28.0095 \text{ kg / kmol}} \times (16,194,195.05 - 4.05) \text{ kJ / kmol} \\
& + \frac{0.000276 \text{ kg / s}}{31.999 \text{ kg / kmol}} \times (16,654,684.67 - 4.05) \text{ kJ / kmol} \\
& + \frac{0.001005 \text{ kg / s}}{28.013 \text{ kg / kmol}} \times (16,127,622.07 - 4.05) \text{ kJ / kmol} \\
& + \frac{0.000190 \text{ kg / s}}{18.0155 \text{ kg / kmol}} \times (18,933,434.45 - 4.65) \text{ kJ / kmol}
\end{aligned}$$

$$Q_{st_1} = 1135.57 \text{ kJ / s}$$

จากนั้นทำการคำนวณทุกๆวินาทีที่ตลอดการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ดำเนินการทดลองจำนวน 15,000 วินาทีดังที่กล่าวข้างต้น พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียรวมจึงมีค่าเท่ากับ

$$Q_{st} = \sum_{i=1}^{15,000} (Q_{st_i})$$

เมื่อ Q_{st} คือค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสีย (กิโลจูล)

$$Q_{st} = 5,401.57 \text{ กิโลจูล}$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียรวมสำหรับ ปริมาณซีลื้อย 11 กิโลกรัม อัตราไหลก๊าซบีโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} มีค่าเท่ากับ 5,401.57

ค.1.2.2 พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการไพโรไลซิส

ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการไพโรไลซิสหาได้จากค่าพลังงานความร้อนค่าเข้าลบด้วยพลังงานความร้อนที่สูญเสีย จะได้ว่า

$$Q_{uf} = Q_f - (Q_{lcp} + Q_{ub} + Q_{mt} + Q_{st} + Q_{sf} + Q_{ucd})$$

เมื่อ Q_{uf} คือ ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการไพโรไลซิส (กิโลจูล)

$$Q_{uf} = 187,222.26 - (69,447.04 + 38,798.30 + 2,145.25 + 5,401.57 + 525.88 + 35,525.23)$$

$$Q_{uf} = 35,378.99 \text{ กิโลจูล}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการไพโรไลซิสสำหรับชีวมวล 11 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 35,378.99 กิโลจูล

ค.2 การคำนวณกำลังของเตา

วิธีคำนวณกำลังของเตา (กิโลวัตต์) ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการต้มน้ำโดยควบคุมอุณหภูมิน้ำให้ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนที่สูญเสียไปจากการระเหยน้ำ (Latent Heat) ดังนั้น ความร้อนที่น้ำได้รับจึงมีเพียงความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการติดเตาแบบต่อเนื่อง โดยไม่มีการปรับแต่งตัวแปรที่เพิ่มหรือลดกำลังของเตา การต้มน้ำจึงทำโดยการกำหนดเวลาในการต้ม เป็น 9 นาที ต่อ ครั้ง และกำหนดการต้ม น้ำทุก 40 นาที ไปจนจบการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยในการหาค่าเฉลี่ยกำลังของเตาต่อไป

สำหรับ ภาชนะที่ใช้ในการต้มน้ำใช้หม้อเบอร์ 40 บรรจุด้วยน้ำประปา 10 กิโลกรัม วัดอุณหภูมิ น้ำ 3 จุด ด้วยสารเทอร์โมคัปเปิลไทด์เค (Type K Thermo couple) อ่านค่าด้วยดาตาล็อกเกอร์ บันทึกผลทุก 3 นาที



ตัวอย่างการคำนวณ ใช้ข้อมูล เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร
ตารางภาคผนวก ค.7 ข้อมูลการต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (10. นาที)	0	39.8	37.2	38.1	38.4
	3	48.0	48.0	46.8	47.6
	6	56.3	55.3	55.4	55.7
	9	62.3	62.3	61.5	62.0
2 (50 นาที)	0	35.1	36.2	35.7	35.6
	3	43.2	46.1	43.2	44.2
	6	51.8	51.1	51.4	51.4
	9	58.9	59.9	59.3	59.4
3 (1.3 ชั่วโมง)	0	36.0	35.0	35.9	35.6
	1	44.1	44.0	44.2	44.1
	6	51.6	52.5	52.2	52.1
	9	61.4	61.4	61.9	61.6
4 (2.1 ชั่วโมง)	0	35.0	34.9	33.9	34.6
	3	40.4	40.3	40.5	40.4
	6	47.4	47.2	46.6	47.1
	9	51.9	52.4	53.2	52.5
5 (2.5 ชั่วโมง)	0	34.9	35.2	34.6	34.9
	3	41.8	43.3	42.8	42.6
	6	48	47.9	48.2	48.0
	9	54.5	54.4	54.9	54.6
6 (3.3 ชั่วโมง)	0	32.4	32.1	32.4	32.3
	3	39.1	43.1	41.2	41.1
	6	49.4	50.6	51.4	50.5
	9	60.1	61.1	61.3	60.8
7 (4.1 ชั่วโมง)	0	35.7	37.0	35.6	36.1
	3	48.4	49.4	42.2	46.7
	6	63.2	64.5	63.2	63.6
	9	72.3	72.9	73.7	73.0

สูตร ที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{กำลังของเตา} \quad Power = \frac{m_{\text{water}} \times C_p \times (T_2 - T_1)}{t}$$

- เมื่อ m_{water} คือ มวลของน้ำ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
 C_p ค่าความจุความร้อนของน้ำ เป็น กิโลจูลต่อ กิโลกรัม
 T_2 อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
 T_1 อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

ครั้งที่ 1 $m_{\text{water}} = 10$ กิโลกรัม , $C_p = 4.16$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม, $T_2 = 61.5$ องศาเซลเซียส
 $T_1 = 38.4$ องศาเซลเซียส, $t = 540$ วินาที

แทนค่า ในสูตร
$$Power = \frac{10 \times 4.16 \times (61.5 - 38.4)}{540}$$

 $= 1.84$ กิโลวัตต์

ครั้งที่ 2 $m_{\text{water}} = 10$ กิโลกรัม , $C_p = 4.16$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม, $T_2 = 59.4$ องศาเซลเซียส
 $T_1 = 35.7$ องศาเซลเซียส, $t = 540$ วินาที

แทนค่า ในสูตร
$$Power = \frac{10 \times 4.16 \times (59.4 - 35.7)}{540}$$

 $= 1.84$ กิโลวัตต์

ครั้งที่ 3 $m_{\text{water}} = 10$ กิโลกรัม , $C_p = 4.16$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม, $T_2 = 61.6$ องศาเซลเซียส
 $T_1 = 35.6$ องศาเซลเซียส, $t = 540$ วินาที

แทนค่า ในสูตร
$$Power = \frac{10 \times 4.16 \times (61.6 - 35.6)}{540}$$

 $= 2.01$ กิโลวัตต์

ครั้งที่ 4 $m_{\text{water}} = 10$ กิโลกรัม , $C_p = 4.16$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม, $T_2 = 52.5$ องศาเซลเซียส
 $T_1 = 34.6$ องศาเซลเซียส, $t = 540$ วินาที

แทนค่า ในสูตร
$$Power = \frac{10 \times 4.16 \times (52.5 - 34.6)}{540}$$

 $= 1.39$ กิโลวัตต์

ครั้งที่ 5 $m_{\text{water}} = 10$ กิโลกรัม , $C_p = 4.16$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม, $T_2 = 54.6$ องศาเซลเซียส
 $T_1 = 34.9$ องศาเซลเซียส, $t = 540$ วินาที

แทนค่า ในสูตร
$$Power = \frac{10 \times 4.16 \times (54.6 - 34.9)}{540}$$

 $= 1.53$ กิโลวัตต์

ครั้งที่ 6 $m_{\text{water}} = 10$ กิโลกรัม , $C_p = 4.16$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม, $T_2 = 60.8$ องศาเซลเซียส
 $T_1 = 32.3$ องศาเซลเซียส, $t = 540$ วินาที

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า ในสูตร} \quad \text{Power} &= \frac{10 \times 4.16 \times (60.8 - 32.3)}{540} \\ &= 2.21 \text{ กิโลวัตต์} \end{aligned}$$

ครั้งที่ 7 $m_{\text{water}} = 10$ กิโลกรัม , $C_p = 4.16$ กิโลจูลต่อกิโลกรัม, $T_2 = 73$ องศาเซลเซียส
 $T_1 = 36.1$ องศาเซลเซียส, $t = 540$ วินาที

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า ในสูตร} \quad \text{Power} &= \frac{10 \times 4.16 \times (73.00 - 36.10)}{540} \\ &= 2.86 \text{ กิโลวัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังเตาโดยเฉลี่ย} &= \frac{1.84 + 1.84 + 2.01 + 1.39 + 1.53 + 2.21 + 2.86}{7} \\ &= 1.95 \text{ กิโลวัตต์} \end{aligned}$$



ตารางภาคผนวก ค.8 คุณสมบัติของก๊าซจากการเผาไหม้

T(K)	H ₂ O	N ₂	CO ₂	O ₂	CO
	h ₂₉₈ (kJ/kmol)	h-h ₂₉₈ (kJ/kmol)	h-h ₂₉₈ (kJ/kmol)	h-h ₂₉₈ (kJ/kmol)	h ₂₉₈ (kJ/kmol)
0	-9904	-8670	-9364	-8683	-8671
100	-6617	-5768	-6457	-5777	-5772
200	-3282	-2857	-3413	-2868	-2860
298	0	0	0	0	0
300	62	54	69	54	54
400	3450	2971	4003	3027	2977
500	6922	5911	8305	6086	5932
600	10499	8894	12906	9245	8942
700	14190	11937	17754	12499	12021
800	18002	15046	22806	15836	15174
900	21937	18223	28030	19241	18397
1000	26000	21463	33397	22703	21686
1100	30190	24760	38885	26212	25031
1200	34506	28109	44473	29761	28427
1300	38941	31503	50148	33345	31867
1400	43491	34936	55895	36958	35343
1500	48149	38405	61705	40600	38852
1600	52907	41904	67569	44267	42388
1700	57757	45430	73480	47959	45948
1800	62693	48979	79432	51674	49529
1900	67706	52549	85420	55414	53128
2000	72788	56137	91439	59176	56743
2200	83153	63362	103562	66770	64012
2400	93741	70640	115779	74453	71326
2600	104520	77963	128074	82225	78679
2800	115463	85323	140435	90080	86070
3000	126548	92715	152853	98013	93504
3200	137756	100134	165321	106022	100962
3400	149073	107577	177836	114101	108440
3600	160484	115042	190394	122245	115938
3800	171981	122526	202990	130447	123454
4000	183552	130027	215624	138705	130989
4400	206892	145078	240992	155374	146108
4800	230456	160188	266488	172240	161285
5200	254216	175352	292112	189312	176510
5600	278161	190572	317870	206618	191782
6000	302295	205848	343782	224210	207105



ตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที (D225F0)

ตารางภาคผนวก ง.1 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อัตราการเผาไหม้ (กิโลกรัม)
0	0	0
5	0.16	0.16
10	0.28	0.12
15	0.38	0.10
20	0.48	0.10
25	0.61	0.13
30	0.70	0.09
35	0.79	0.09
40	0.92	0.13
45	1.04	0.12
50	1.14	0.10
55	1.27	0.13
60	1.38	0.11
1.05	1.50	0.12
1.10	1.66	0.16
1.15	1.76	0.10
1.20	1.91	0.15
1.25	2.06	0.15
1.30	2.27	0.21
1.35	2.42	0.15
1.40	2.60	0.18
1.45	2.65	0.05
Total firing time = 6,300 วินาที		

ตารางภาคผนวก ง.2 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1	0	55.1	50.1	55.7	53.6
	3	59.5	-	59.1	59.3
	6	62.6	-	62.1	62.4
	9	64.9	-	64.6	64.8
2	0	34.5	-	34.3	34.4
	3	36.6	37.4	36.0	36.7
	6	41.4	41.6	41.7	41.6
	9	45.6	45.6	45.3	45.5
3	0	45.2	45.3	46.0	45.5
	3	49.2	49.0	49.7	49.3
	6	53.0	52.3	53.0	52.8
4	0	33.4	32.9	33.4	33.2
	3	40.1	39.2	41.0	40.1
	6	48.3	47.7	47.8	47.9

ตารางภาคผนวก ง.3 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	15 min	7	3.5	68
2	35 min	8	3.5	72
3	45 min	6	3	70
4	1.25 h	7	3.5	69.9
5	1.45 h	6	4	77.5

ตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัม ต่อวินาที (D225F7)

ตารางภาคผนวก ง.4 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อัตราการเผาไหม้ (กิโลกรัม)
0	0	0
5	0.16	0.16
10	0.28	0.12
15	0.38	0.10
20	0.48	0.10
25	0.70	0.22
30	0.85	0.15
35	0.93	0.08
40	1.06	0.13
45	1.19	0.13
50	1.30	0.11
55	1.45	0.15
60	1.53	0.08
1.05	1.81	0.28
1.10	1.97	0.16
1.15	2.05	0.08
1.20	2.16	0.11
1.25	2.34	0.18
1.30	2.74	0.40
1.35	2.85	0.11
1.40	2.91	0.06
Total firing time = 6,000 วินาที		

ตารางภาคผนวก ง.5 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1	0	43.0	42.0	44.0	43.0
	3	53.0	33.9	52.6	46.5
	6	58.6	58.1	60.3	59.0
	7	60.6	60.4	61.6	60.9
2	0	34.3	33.4	34.9	34.2
	3	40.3	39.7	40.8	40.3
	6	46.7	45.0	47.2	46.3
	9	53.7	51.1	52.0	52.3
3	0	35.5	34.9	35.1	35.2
	3	46.1	44.3	48.8	46.4
	6	53.4	58.3	58.4	56.7
	9	-	-	-	-
4	0	35.8	35.2	34.4	35.1
	3	46.8	45.7	47.2	46.6
	6	52.6	53.5	54.8	53.6
	9	58.9	59.2	60.2	59.4

ตารางภาคผนวก ง.6 การวัดปล่องเตา

ครั้งที่	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	12	4.5	100
2	10.5	4.5	72
3	9	4	70
4	8.5	6.5	69.9

ตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D225F14)

ตารางภาคผนวก ง.7 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อัตราการเผาไหม้ (กิโลกรัม)
0	0	0
5	0.12	0.12
10	0.32	0.20
15	0.40	0.08
20	0.54	0.14
25	0.70	0.16
30	0.85	0.16
35	0.97	0.12
40	1.13	0.16
45	1.27	0.14
50	1.52	0.25
55	1.70	0.18
60	1.86	0.16
1.05	2.05	0.19
1.10	2.20	0.15
1.15	2.42	0.22
1.20	2.64	0.22
1.25	2.82	0.18
1.30	3.01	0.19
1.35	3.29	0.28
1.40	3.40	0.11
Total firing time = 6,000 วินาที		

ตารางภาคผนวก ง.8 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1	0	36.0	39.0	36.0	37.0
	3	45.9	44.1	45.8	45.3
	6	51.2	49.4	51.0	50.5
	9	56.9	54.6	55.8	55.8
2	0	34.4	34.7	34.5	34.5
	3	41.5	41.0	41.3	41.3
	6	47.9	46.8	46.1	46.9
	9	54.3	52.5	52.0	52.9
3	0	36.8	36.0	36.7	36.5
	5	55.8	53.3	54.1	54.4
	6	58.9	57.1	58.0	58.0
	6.39	62.0	58.8	61.0	60.6

ตารางภาคผนวก ง.9 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	5 min	7.5	5	145
2	23 min	7	5	119
3	41 min	7.5	4	116
4	1.09 h	6.5	4	118
5	1.3 h	6.5	6.5	120

ตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 225 มิลลิเมตร อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.0×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D225F21)

ตารางภาคผนวก ง.10 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อัตราการเผาไหม้ (กิโลกรัม)
0	0	0
5	0.18	0.18
10	0.72	0.54
15	0.74	0.02
20	0.94	0.20
25	1.30	0.36
30	1.43	0.13
35	1.53	0.10
40	1.64	0.11
45	1.71	0.07
50	1.82	0.11
55	1.90	0.08
60	2.01	0.11
1.05	2.23	0.22
1.10	2.38	0.15
1.15	2.57	0.19
1.20	2.70	0.13
1.25	2.91	0.21
1.30	3.09	0.18
1.35	3.25	0.16
1.40	3.34	0.09
Total firing time = 6,000 วินาที		

ตารางภาคผนวก ง.11 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1	0	33.0	33.5	36.5	34.3
	3	45.0	44.8	45.6	45.1
	6	51.0	51.1	52.8	51.6
	9	61.4	61.7	61.8	61.6
2	0	39.8	40.3	40.6	40.2
	3	44.8	46.8	46.6	46.1
	6	51.5	54.8	54.1	53.5
	9	55.8	60.4	60.4	58.9
3	0	41.4	41.8	42.0	41.7
	4	50.8	50.6	51.5	51.0
	7	60.4	61.1	60.8	60.8
4	0	35.7	35.8	35.5	35.7
	3	46.8	46.5	46.7	46.7
	5.5	60.4	59.1	60.8	60.1

ตารางภาคผนวก ง.12 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	5 min	7.5	5	112
2	20 min	7.5	4	193
3	60 min	7.5	5	167
4	1.2 h	7.5	5	231
5	1.4 h	7.5	7	191

เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที (D385F0)

ตารางภาคผนวก ง.13 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	นน.ที่ลดลง (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	นน.ที่ลดลง (กิโลกรัม)	รวม
0	81.60	0	0.00	1.55	79.18	0.12	2.42
5	81.46	0.14	0.14	2.00	79.07	0.11	2.53
10	81.37	0.09	0.23	2.05	78.97	0.10	2.63
15	81.25	0.12	0.35	2.10	78.88	0.09	2.72
20	81.15	0.10	0.45	2.15	78.77	0.11	2.83
25	81.05	0.10	0.55	2.20	78.66	0.11	2.94
30	80.97	0.08	0.63	2.25	78.545	0.11	3.05
35	80.89	0.08	0.71	2.30	78.43	0.11	3.17
40	80.81	0.08	0.79	2.35	78.29	0.14	3.31
45	80.68	0.13	0.92	2.40	78.17	0.12	3.43
50	80.54	0.14	1.06	2.45	78.06	0.11	3.54
55	80.44	0.10	1.16	2.50	77.97	0.09	3.63
60	80.37	0.07	1.23	2.55	77.89	0.08	3.71
1.05	80.24	0.14	1.36	3.00	77.81	0.08	3.79
1.10	80.10	0.14	1.50	3.05	77.73	0.08	3.87
1.15	79.98	0.12	1.62	3.10	77.65	0.08	3.95
1.20	79.87	0.11	1.73	3.15	77.52	0.13	4.08
1.25	79.75	0.12	1.85	3.25	77.45	0.07	4.15
1.30	79.66	0.09	1.94	3.30	77.37	0.08	4.23
1.35	79.58	0.08	2.02	3.35	77.26	0.11	4.34
1.40	79.48	0.10	2.12	3.40	77.16	0.10	4.44
1.45	79.39	0.09	2.21	3.45	77.02	0.14	4.58
1.50	79.30	0.09	2.30	Total Firing time = 13,500 วินาที			

ตารางภาคผนวก ง.14 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1	0	33.6	33.1	33.2	33.3
	3	42.8	43.2	42.5	42.8
	6	46.8	46.6	47.2	46.9
	9	49.7	50.1	50.5	50.1
2	0	32.2	32.3	33.7	32.7
	3	37.7	37.9	37.6	37.7
	6	42.0	41.8	42.6	42.1
	9	45.9	45.8	46.5	46.1
3	0	32.3	32.0	33.5	32.6
	1	35.1	35.1	35.3	35.2
	6	38.1	37.9	35.4	37.1
	9	40.9	40.6	38.5	40.0

ตารางภาคผนวก ง.15 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	25 min	16	5	112
2	1.20 h	17	4	193
3	2.1 h	15	5	167

เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D385F7 ครั้งที่ 1)

ตารางภาคผนวก ง.16 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการเผา ไหม้ (กิโลกรัม)	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการเผา ไหม้ (กิโลกรัม)
0	88.03	0	2.05	84.15	0.19
5	87.85	0.18	2.10	83.95	0.20
10	87.66	0.19	2.15	83.75	0.20
15	87.58	0.08	2.20	83.57	0.18
20	87.51	0.07	2.25	83.43	0.14
25	87.41	0.10	2.30	83.27	0.16
30	87.29	0.12	2.35	83.06	0.21
35	87.13	0.17	2.40	82.84	0.22
40	86.96	0.17	2.45	82.68	0.16
45	86.81	0.15	2.50	82.50	0.18
50	86.67	0.14	2.55	82.35	0.15
55	86.55	0.12	3.00	82.15	0.20
60	86.38	0.17	3.05	81.93	0.22
1.05	86.08	0.30	3.10	81.71	0.22
1.10	85.97	0.11	3.15	81.60	0.11
1.15	85.81	0.16	3.20	81.31	0.29
1.20	85.67	0.14	3.25	81.23	0.08
1.25	85.52	0.15	3.30	80.99	0.24
1.30	85.37	0.15	3.35	80.81	0.18
1.35	85.11	0.26	3.40	80.65	0.16
1.40	84.99	0.12	3.45	80.49	0.16
1.45	84.81	0.18	3.50	80.29	0.20
1.50	84.61	0.20	3.55	80.15	0.14
1.55	84.48	0.13	4.00	80.00	0.15
2.00	84.34	0.14	4.05	79.87	0.13
Total Firing time = 14,700 วินาที					

ตารางภาคผนวก ง.17 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (5 min)	0	38.0	37.8	38.2	38.0
	3	43.5	44.5	45.4	44.5
	6	51.7	51.8	51.9	51.8
	9	58.5	58.9	58.9	58.8
2 (30 min)	0	33.7	33.7	33.6	50.5
	3	40.6	40.6	40.5	40.6
	6	47.4	47.6	47.8	47.6
	9	53.4	55.1	54.3	54.3
3 (1 h)	0	35.5	35.7	35.8	35.7
	1	40.6	43.1	43.7	42.5
	6	46.8	48.7	48.3	47.9
	9	52.8	53.2	53.7	53.2
4 (1.30 h)	0	33.5	33.4	33.4	33.4
	3	37.9	39.3	39.8	39.0
	6	44.8	45.5	45.9	45.4
	9	49.8	50.2	50.8	50.3
5 (2 h)	0	33.2	32.3	33.1	32.9
	3	39.3	39.1	39.5	39.3
	6	44.8	45.4	45.6	45.3
	9	49.8	50.6	50.9	50.4
6 (2.30 h)	0	33.9	33.4	33.9	33.7
	3	40.3	40.1	39.8	40.1
	6	45.5	45.6	45.5	45.5
	9	50.4	50.3	50.6	50.4

7 (3 h)	0	33.9	34.2	33.5	33.9
	3	39.1	39.9	39.9	39.6
	6	45.0	45.4	45.4	45.3
	9	50.2	50.4	50.5	50.4
8 (3.30 h)	0	47.5	47.4	47.5	47.5
	3	52.2	53.9	52.1	52.7
	6	57.4	58.7	58.0	58.0
	9	61.8	62.1	62.3	62.1

ตารางภาคผนวก ง. 18 การวัดปล่องเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	5 min	4.00	8.00	130
		4.50	8.00	165
2	30 min	4.00	7.50	150
		4.00	8.00	273
3	1 h	4.00	6.50	116
		3.50	7.00	201
4	1.30 h	3.50	4.50	101
		3.00	5.50	152
5	2 h	3.00	4.00	88
		3.00	4.50	169
6	2.5 h	1.50	4.00	93
		1.50	4.00	147.3
7	3 h	2.50	4.50	217
		2.00	1.00	204
8	3.5 h	4.00	4.00	145
		2.50	4.00	120

ตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D385F7 ครั้งที่ 2)

ตารางภาคผนวก ง.19 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	81.47	0	0.00	2.05	78.59	0.13	2.88
5	81.35	0.12	0.12	2.10	78.48	0.11	2.99
10	81.24	0.11	0.23	2.15	78.35	0.13	3.12
15	81.12	0.12	0.35	2.20	78.23	0.12	3.24
20	81.02	0.10	0.45	2.25	78.08	0.16	3.40
25	80.93	0.09	0.54	2.30	77.92	0.16	3.55
30	80.87	0.06	0.60	2.35	77.76	0.16	3.71
35	80.78	0.09	0.69	2.40	77.63	0.13	3.84
40	80.67	0.11	0.80	2.45	77.49	0.14	3.98
45	80.56	0.11	81.47	2.50	77.37	0.12	4.10
50	80.45	0.11	1.02	2.55	77.24	0.13	4.23
55	80.33	0.12	1.14	3.00	77.12	0.12	4.35
60	80.23	0.11	1.45	3.05	76.97	0.16	4.51
1.05	80.16	0.07	1.37	3.10	76.81	0.16	4.66
1.10	80.05	0.11	1.37	3.15	76.67	0.14	4.80
1.15	79.98	0.12	1.49	3.20	76.51	0.16	4.96
1.20	79.87	0.11	1.60	3.25	76.35	0.16	5.12
1.25	79.75	0.12	1.72	3.30	76.21	0.14	5.26
1.30	79.66	0.09	1.81	3.35	76.05	0.16	5.42
1.35	79.35	0.31	2.12	3.40	75.89	0.16	5.58
1.40	79.23	0.12	2.24	3.45	75.70	0.19	5.77
1.45	79.07	0.16	81.47	3.50	75.46	0.24	6.01
1.50	78.98	0.09	2.49	3.55	75.24	0.22	6.23
1.55	78.85	0.13	2.62	4.00	74.99	0.25	6.48
2.00	78.72	0.13	2.75	4.05	74.72	0.27	6.75

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
4.10	74.44	0.28	7.03	4.25	73.45	0.32	8.03
4.15	74.00	0.44	7.47	4.30	73.13	0.31	8.34
4.20	73.76	0.24	7.71	Total Firing time = 16,200 วินาที			

ตารางภาคผนวก ง.20 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (25 min)	0	34.1	33.6	34.0	33.9
	3	41.6	42.1	42.2	42.0
	6	48.1	48.4	47.8	48.1
	9	54.5	53.5	54.5	54.2
2 (2.1 h)	0	32.6	32.1	33.8	49.3
	3	40.1	40.1	41.2	40.5
	6	47.7	46.7	47.7	47.4
	9	53.9	54.5	53.1	53.8
3 (2.5 h)	0	31.4	31.8	31.1	31.4
	1	38.9	38.8	38.7	38.8
	6	46.0	45.2	47.0	46.1
	9	52.4	51.7	53.0	52.4
4 (3.3)	0	32.2	32.4	32.2	32.3
	3	40.9	39.6	39.0	39.8
	6	47.7	46.3	47.5	47.2
	9	55.4	55.4	56.5	55.8
5 (4.1)	0	37.5	38.0	38.1	37.9
	3	58.3	58.6	59.3	58.7
	6	73.6	74.3	74.4	74.1
	9	89.0	90.3	89.4	89.6

ตารางภาคผนวก ง.21 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	25 min	13.00	6.50	130
2	2.1 h	16.00	4.00	133
3	2.5 h	15.50	4.00	123
4	3.3 h	14.50	7.00	183
5	4.1 h	11.00	10.00	258



เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.0×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D385F7 ครั้งที่ 3)

ตารางภาคผนวก ง.22 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	80.56	0	0.00	2.10	76.80	0.15	3.76
5	80.34	0.22	0.22	2.15	76.64	0.16	3.92
10	80.14	0.20	0.42	2.20	76.48	0.16	4.08
15	80.10	0.04	0.46	2.25	76.33	0.15	4.23
20	79.92	0.18	0.64	2.30	76.18	0.15	4.38
25	79.75	0.17	0.81	2.35	76.01	0.17	4.55
30	79.69	0.06	0.87	2.40	75.86	0.15	4.70
35	79.56	0.13	1.00	2.45	75.65	0.21	4.91
40	79.50	0.06	1.06	2.50	75.48	0.17	5.08
45	79.36	0.14	1.20	2.55	75.29	0.19	5.27
50	79.25	0.11	1.31	3.00	75.11	0.18	5.45
55	79.12	0.13	1.44	3.05	74.93	0.18	5.63
60	79.02	0.10	1.54	3.10	74.72	0.21	5.84
1.05	78.83	0.19	1.73	3.15	74.53	0.19	6.03
1.10	78.69	0.14	1.87	3.20	74.34	0.19	6.22
1.15	78.52	0.17	2.04	3.25	74.10	0.24	6.46
1.20	78.37	0.15	2.19	3.30	73.86	0.24	6.70
1.25	78.22	0.15	2.34	3.35	73.57	0.29	6.99
1.30	78.08	0.14	2.48	3.40	73.26	0.31	7.30
1.35	77.93	0.15	2.63	3.45	72.92	0.34	7.64
1.40	77.77	0.16	2.79	3.50	72.49	0.43	8.07
1.45	77.62	0.15	2.94	3.55	72.27	0.22	8.29
1.50	77.47	0.15	3.09	4.00	72.07	0.20	8.49
1.55	77.25	0.22	3.31	4.05	71.95	0.12	8.61
2.00	77.11	0.14	3.45	4.10	71.92	0.03	8.64
2.05	76.95	0.16	3.61	Total Firing time = 15,000 วินาที			

ตารางภาคผนวก ง.23 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (5 min)	0	32.5	32.9	32.4	32.6
	3	36.9	37.7	37.1	37.2
	6	46.4	46.9	46.4	46.6
	9	54.9	55.4	54.9	55.1
2 (50 min)	0	30.0	30.5	30.2	45.4
	3	39.3	39.3	40.0	39.5
	6	48.5	48.1	48.6	48.4
	9	55.1	55.6	55.4	55.4
3 (1.40 h)	0	30.0	30.3	30.0	30.1
	1	38.9	39.4	39.1	39.1
	6	45.3	45.6	45.5	45.5
	9	53.1	53.8	53.2	53.4
4 (2.30 h)	0	30.6	30.8	30.8	30.7
	3	38.2	38.1	38.3	38.2
	6	45.5	45.9	45.2	45.5
	9	52.5	52.7	52.6	52.6
5 (3.20 h)	0	30.6	30.6	30.5	30.6
	3	44.3	44.9	44.4	44.5
	6	54.1	54.6	54.0	54.2
	9	66.2	66.9	66.7	66.6
6 (3.45 h)	0	30.6	30.8	30.8	30.7
	3	53.2	53.4	53.0	53.2
	6	75.2	75.7	75.2	75.4
	9	90.9	91.9	90.3	91.0

ตารางภาคผนวก ง.24 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	5 min	13.50	9.00	141.6
2	50 min	14.00	7.00	165
3	1.40 h	15.00	5.50	143.5
4	2.30 h	15.50	5.50	161
5	3.20 h	13.50	7.50	132
6	3.45 h	13.00	7.00	160.5



เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.0×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D385F14)

ตารางภาคผนวก ง.25 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	81.90	0	0.00	2.10	78.49	0.11	3.41
5	81.79	0.11	0.11	2.15	78.30	0.19	3.60
10	81.78	0.01	0.12	2.20	78.15	0.15	3.75
15	81.59	0.19	0.31	2.25	78.03	0.12	3.87
20	81.47	0.12	0.43	2.30	77.84	0.19	4.07
25	81.34	0.13	0.56	2.35	77.64	0.20	4.26
30	81.23	0.11	0.67	2.40	77.45	0.19	4.45
35	81.12	0.11	0.78	2.45	77.28	0.17	4.62
40	81.01	0.11	0.89	2.50	77.12	0.16	4.78
45	80.92	0.09	0.98	2.55	76.95	0.17	4.95
50	80.82	0.10	1.08	3.00	76.80	0.15	5.10
55	80.72	0.10	1.18	3.05	76.63	0.17	5.27
60	80.63	0.09	1.27	3.10	76.46	0.17	5.44
1.05	80.50	0.13	1.41	3.15	76.27	0.19	5.63
1.10	80.36	0.14	1.54	3.20	76.03	0.24	5.87
1.15	80.22	0.14	1.68	3.25	75.70	0.33	6.20
1.20	80.05	0.17	1.85	3.30	75.50	0.20	6.40
1.25	79.92	0.13	1.98	3.35	75.29	0.21	6.61
1.30	79.72	0.20	2.18	3.40	75.22	0.07	6.68
1.35	79.57	0.12	2.33	3.45	74.90	0.33	7.01
1.40	79.45	0.12	2.48	3.50	74.57	0.33	7.33
1.45	79.42	0.03	2.45	3.55	74.18	0.39	7.72
1.50	79.09	0.33	2.81	4.00	74.02	0.16	7.88
1.55	78.90	0.19	3.00	4.05	73.67	0.35	8.23
2.00	78.74	0.16	3.16	4.10	73.38	0.29	8.52
2.05	78.60	0.14	3.30	total firing time = 15,000 วินาที			

ตารางภาคผนวก ง.26 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (10. min)	0	39.8	37.2	38.1	38.4
	3	48.0	48.0	46.8	47.6
	6	56.3	55.3	55.4	55.7
	9	62.3	62.3	61.5	62.0
2 (50 min)	0	35.1	36.2	35.7	35.7
	3	43.2	46.1	43.2	44.2
	6	51.8	51.1	51.4	51.4
	9	58.9	59.9	59.3	59.4
3 (1.3 h)	0	36.0	35.0	35.9	35.6
	1	44.1	44.0	44.2	44.1
	6	51.6	52.5	52.2	52.1
	9	61.4	61.4	61.9	61.6
4 (2.1 h)	0	35.0	34.9	33.9	34.6
	3	40.4	40.3	40.5	40.4
	6	47.4	47.2	46.6	47.1
	9	51.9	52.4	53.2	52.5
5 (2.5 h)	0	34.9	35.2	34.6	34.9
	3	41.8	43.3	42.8	42.6
	6	48.0	47.9	48.2	48.0
	9	54.5	54.4	54.9	54.6
6 (3.3 h)	0	32.4	32.1	32.4	32.3
	3	39.1	43.1	41.2	41.1
	6	49.4	50.6	51.4	50.5
	9	60.1	61.1	61.3	60.8
7 (4.1 h)	0	35.7	37.0	35.6	36.1
	3	48.4	49.4	42.2	46.7
	6	63.2	64.5	63.2	63.6
	9	72.3	72.9	73.7	73.0

ตารางภาคผนวก ง.27 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	10 min	12.5	8	233
2	50 min	12.5	7	102
3	1.3 h	12	5	123
4	2.1 h	15	4	154
5	2.5 h	14	5	102
6	3.3 h	10.5	7	118
7	4.1 h	14	4	122



เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 385 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.0×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D385F21)

ตารางภาคผนวก ง. 28 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	81.53	0	0.00	2.05	78.41	0.13	3.12
5	81.37	0.16	0.16	2.10	78.28	0.13	3.25
10	81.20	0.17	0.33	2.15	78.15	0.13	3.38
15	81.10	0.10	0.43	2.20	78.03	0.12	3.50
20	80.98	0.12	0.42	2.25	77.40	0.63	4.44
25	80.95	0.03	0.08	2.30	77.23	0.17	4.38
30	80.94	0.01	0.59	2.35	77.21	0.02	4.32
35	80.69	0.25	0.84	2.40	77.15	0.06	4.13
40	80.61	0.08	0.92	2.45	77.09	0.06	4.30
45	80.52	0.09	1.01	2.50	77.02	0.07	4.51
50	80.41	0.11	1.12	2.55	76.89	0.13	4.64
55	80.31	0.10	1.22	3.00	76.68	0.21	4.85
60	80.18	0.13	1.35	3.05	76.50	0.18	5.03
1.05	80.02	0.16	1.51	3.10	76.31	0.19	5.22
1.10	79.86	0.16	1.67	3.15	76.07	0.24	5.46
1.15	79.74	0.12	1.79	3.20	75.82	0.25	5.71
1.20	79.62	0.12	1.91	3.25	75.59	0.23	5.94
1.25	79.50	0.12	2.03	3.30	75.32	0.27	6.21
1.30	79.38	0.12	2.15	3.35	75.02	0.30	6.51
1.35	79.25	0.13	2.28	3.40	74.70	0.32	6.83
1.40	79.12	0.13	2.41	3.45	74.40	0.30	7.13
1.45	79.01	0.11	2.52	3.50	74.09	0.31	7.44
1.50	78.86	0.15	2.67	3.55	73.84	0.25	7.69
1.55	78.70	0.16	2.83	4.00	73.64	0.20	7.89
2.00	78.54	0.16	2.99	4.05	73.30	0.34	8.23

เวลา	นน.รวม Reactor	อัตราการ เผาไหม้	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor	อัตราการ เผาไหม้	รวม
4.10	73.12	0.18	8.41	4.20	72.70	0.25	8.83
4.15	72.95	0.17	8.58	4.25	72.56	0.14	8.97
total firing time = 15,900 วินาที							

ตารางภาคผนวก ง.29 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (5 min)	0	37.5	39.0	40.9	39.1
	3	46.5	47.2	42.2	45.3
	6	54.0	53.8	45.2	51.0
	9	63.2	62.3	58.9	61.5
2 (50 min)	0	33.4	34.5	33.0	33.6
	3	43.5	43.7	46.0	44.4
	6	52.9	52.7	51.2	52.3
	9	61.3	61.0	57.3	59.9
3 (1.3 h)	0	34.2	35.0	34.7	34.6
	3	42.9	42.2	45.2	43.4
	6	50.1	48.9	49.3	49.4
	9	55.5	55.1	56.5	55.7
4 (2.1 h)	0	32.0	32.4	32.9	32.4
	3	40.4	40.5	40.4	40.4
	6	49.1	48.3	53.7	50.4
	9	54.1	54.1	57.1	55.1
5 (2.5)	0	32.9	33.6	32.3	32.9
	3	43.2	41.7	39.0	41.3
	6	52.7	52.8	-	52.8
	9	60.7	59.8	-	60.3

6 (3.3 h)	0	34.4	36.4	34.4	35.1
	3	52.2	52.0	53.7	52.6
	6	70.4	69.5	70.2	70.0
	9	85.4	85.1	81.5	84.0
7 (4.1 h)	0	36.0	36.7	32.3	35.0
	3	51.0	52.5	45.7	49.7
	6	65.2	66.7	-	66.0
	9	76.1	77.6	-	76.9

ตารางภาคผนวก ง.30 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	10 min	14.5	7	173
2	50 min	13	8	135
3	1.3 h	16	4.5	138
4	2.1 h	16	4.5	159
5	2.5 h	14	6.5	292
6	3.3 h	12	10.5	281
7	4.1 h	15.5	4	149

เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร อัตราไหลก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0 กิโลกรัมต่อวินาที (D550F0)

ตารางภาคผนวก ง.31 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการเผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการเผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	104.66	0	0.00	2.05	100.36	0.15	4.30
5	104.38	0.28	0.28	2.10	100.22	0.14	4.44
10	104.22	0.16	0.44	2.15	100.05	0.17	4.61
15	104.02	0.20	0.64	2.20	99.91	0.14	4.75
20	103.86	0.16	0.80	2.25	99.67	0.24	4.99
25	103.77	0.09	0.89	2.30	99.50	0.17	5.16
30	103.62	0.15	1.04	2.35	99.33	0.17	5.33
35	103.50	0.12	1.16	2.40	99.18	0.15	5.48
40	103.38	0.12	1.28	2.45	99.02	0.16	5.64
45	103.26	0.12	1.40	2.50	98.87	0.15	5.79
50	103.04	0.22	1.62	2.55	98.72	0.15	5.94
55	102.93	0.11	1.73	3.00	98.54	0.18	6.12
60	102.75	0.18	1.91	3.05	98.42	0.12	6.24
1.05	102.59	0.16	2.07	3.10	98.30	0.12	6.36
1.10	102.40	0.19	2.26	3.15	98.15	0.15	6.51
1.15	102.20	0.20	2.46	3.20	98.00	0.15	7.64
1.20	101.95	0.25	2.71	3.25	97.80	0.20	6.86
1.25	101.75	0.20	2.91	3.30	97.63	0.17	7.03
1.30	101.56	0.19	3.10	3.35	97.48	0.15	7.18
1.35	101.35	0.21	3.31	3.40	97.34	0.14	7.32
1.40	101.17	0.18	3.49	3.45	97.20	0.14	7.46
1.45	101.00	0.17	3.66	3.50	97.04	0.16	7.62
1.50	100.83	0.17	3.83	3.55	96.89	0.15	7.77
1.55	100.67	0.16	3.99	4.00	96.72	0.17	7.94
2.00	100.51	0.16	4.15	4.05	96.59	0.13	8.07
4.10	96.44	0.15	8.22	4.20	96.12	0.18	8.54
4.15	96.30	0.14	8.36	Total Firing time = 15,600 วินาที			

ตารางภาคผนวก ง.32 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (1 h)	0	40.6	41.2	40.7	40.8
	3	48.1	48.9	48.9	48.6
	6	57.2	58.8	58.7	58.2
	9	67.3	68.0	67.4	67.6
2 (2 h)	0	30.4	31.5	30.5	46.2
	3	37.7	38.1	38.1	38.0
	6	42.9	43.8	42.4	43.0
	9	48.0	49.6	48.2	48.6
3 (3 h)	0	27.5	28.3	28.8	28.2
	3	32.7	33.1	33.2	33.0
	6	36.8	37.8	37.8	37.5
	9	41.6	42.6	42.7	42.3
4 (4 h)	0	42.9	44.3	44.6	43.9
	3	48.2	45.5	48.6	47.4
	6	52.5	53.0	53.3	52.9
	9	55.5	57.1	57.1	56.6

ตารางภาคผนวก ง.33 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O2	%CO2	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	1 h	13.00	5.00	273.1
2	2 h	15.00	6.00	241.3
3	3 h	15.00	5.00	288.4

เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 2.38×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D550F7)

ตารางภาคผนวก ง.34 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	104.24	0	0.00	2.05	99.97	0.17	4.27
5	104.06	0.18	0.18	2.10	99.80	0.17	4.44
10	103.94	0.12	0.30	2.15	99.56	0.24	4.68
15	103.73	0.21	0.51	2.20	99.38	0.18	4.86
20	103.57	0.16	0.67	2.25	99.33	0.05	4.91
25	103.39	0.18	0.85	2.30	99.00	0.33	5.24
30	103.23	0.16	1.01	2.35	98.84	0.16	5.40
35	103.09	0.14	1.15	2.40	98.66	0.18	5.58
40	102.94	0.15	1.30	2.45	98.49	0.17	5.75
45	102.77	0.17	1.47	2.50	98.34	0.15	5.90
50	102.62	0.15	1.62	2.55	98.16	0.18	6.08
55	102.45	0.17	1.79	3.00	97.98	0.18	6.26
60	102.27	0.18	1.97	3.05	97.80	0.18	6.44
1.05	102.12	0.15	2.12	3.10	97.64	0.16	6.60
1.10	101.94	0.18	2.30	3.15	97.43	0.21	6.81
1.15	101.69	0.25	2.55	3.20	97.25	0.18	6.99
1.20	101.52	0.17	2.72	3.25	97.04	0.21	7.20
1.25	101.34	0.18	2.90	3.30	96.85	0.19	7.39
1.30	101.16	0.18	3.08	3.35	96.65	0.20	7.59
1.35	100.99	0.17	3.25	3.40	96.47	0.18	7.77
1.40	100.81	0.18	3.43	3.45	96.29	0.18	7.95
1.45	100.66	0.15	3.58	3.50	96.09	0.20	8.15
1.50	100.48	0.18	3.76	3.55	95.99	0.10	8.25
1.55	100.31	0.17	3.93	4.00	95.74	0.25	8.50
2.00	100.14	0.17	4.10	4.05	95.54	0.20	8.70

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
4.10	95.36	0.18	8.88	5.40	91.42	0.29	12.82
4.15	95.13	0.23	9.11	5.45	91.11	0.31	13.13
4.20	94.97	0.16	9.27	5.50	90.81	0.30	13.43
4.25	94.76	0.21	9.48	5.55	90.54	0.27	13.70
4.30	94.58	0.18	9.66	6.00	90.19	0.35	14.05
4.35	94.38	0.20	9.86	6.05	89.85	0.34	14.39
4.40	94.17	0.21	10.07	6.10	89.55	0.30	14.69
4.45	93.96	0.21	10.28	6.15	89.17	0.38	15.07
4.50	93.77	0.19	10.47	6.20	88.92	0.25	15.32
4.55	93.58	0.19	10.66	6.25	88.64	0.28	15.60
5.00	93.38	0.20	10.86	6.30	88.36	0.28	15.88
5.05	93.18	0.20	11.06	6.35	88.10	0.26	16.14
5.10	92.98	0.20	11.26	6.40	87.82	0.28	16.42
5.15	92.62	0.36	11.62	6.45	87.51	0.31	16.73
5.20	92.51	0.11	11.73	6.50	87.21	0.30	17.03
5.25	92.25	0.26	11.99	6.55	86.91	0.30	17.33
5.30	92.00	0.25	12.24	7.00	86.72	0.19	17.52
5.35	91.71	0.29	12.53	Total firing time = 25,200 วินาที			

ตารางภาคผนวก ง.35 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (1 h)	0	37.5	37.7	37.3	37.5
	3	43.7	45.4	43.8	44.3
	6	54.2	52.5	52.6	53.1
	9	64.1	62.7	62.4	63.1
2 (2 h)	0	33.8	34.7	35.4	52.0
	3	40.2	41.1	42.9	41.4
	6	48.2	48.3	49.1	48.5
	9	56.3	56.1	56.6	56.3
3 (3 h)	0	31.8	31.8	32.4	32.0
	3	35.0	37.6	35.2	35.9
	6	45.1	45.1	44.2	44.8
	9	51.7	52.9	52.5	52.4
4 (4 h)	0	33.4	33.2	34.5	33.7
	3	36.2	37.3	37.5	37.0
	6	44.8	44.9	44.0	44.6
	9	51.2	53.0	53.3	52.5
5 (5 h)	0	32.9	32.9	32.4	32.7
	3	37.7	37.6	38.5	37.9
	6	45.2	45.9	45.8	45.6
	9	53.2	53.6	53.2	53.3
6 (6 h)	0	36.0	36.5	37.2	36.6
	3	63.0	63.2	64.8	63.7
	6	78.1	78.6	81	79.2
	9	92.3	94.3	95.2	93.9
7 (7 h)	0	32.8	32.4	32.1	32.4
	3	46.3	46.6	45.6	46.2
	6	54.9	56.0	56.9	55.9
	9	61.9	62.8	61.2	62.0

ตารางภาคผนวก ง.36 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	1 h	13.00	5.00	273.1
2	2 h	15.00	6.00	241.3
3	3 h	15.00	5.00	288.4
4	4 h	14.50	5.00	192.0
5	5 h	14.00	5.50	203.6
6	6 h	11.50	8.00	342.1
7	7 h	14.50	4.50	163.7



เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 3.33×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D550F14)

ตารางภาคผนวก ง.37 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	104.24	0	0.00	2.05	99.79	0.23	4.45
5	104.10	0.14	0.14	2.10	99.60	0.19	4.64
10	103.97	0.13	0.27	2.15	99.34	0.26	4.90
15	103.82	0.15	0.42	2.20	99.08	0.26	5.16
20	103.66	0.16	0.58	2.25	98.88	0.20	5.36
25	103.53	0.13	0.71	2.30	98.68	0.20	5.56
30	103.39	0.14	0.85	2.35	98.48	0.20	5.76
35	103.26	0.13	0.98	2.40	98.28	0.20	5.96
40	103.13	0.13	1.11	2.45	98.10	0.18	6.14
45	102.99	0.14	1.25	2.50	97.93	0.17	6.31
50	102.85	0.14	1.39	2.55	97.75	0.18	6.49
55	102.69	0.16	1.55	3.00	97.53	0.22	6.71
60	102.53	0.16	1.71	3.05	97.38	0.15	6.86
1.05	102.36	0.17	1.88	3.10	97.21	0.17	7.03
1.10	102.15	0.21	2.09	3.15	96.97	0.24	7.27
1.15	101.94	0.21	2.30	3.20	96.73	0.24	7.51
1.20	101.73	0.21	2.51	3.25	96.51	0.22	7.73
1.25	101.52	0.21	2.72	3.30	96.29	0.22	7.95
1.30	101.32	0.20	2.92	3.35	96.14	0.15	8.10
1.35	101.10	0.22	3.14	3.40	95.91	0.23	8.33
1.40	100.89	0.21	3.35	3.45	95.75	0.16	8.49
1.45	100.67	0.22	3.57	3.50	95.52	0.23	8.72
1.50	100.45	0.22	3.79	3.55	95.31	0.21	8.93
1.55	100.24	0.21	4.00	4.00	95.12	0.19	9.12
2.00	100.02	0.22	4.22	4.05	94.98	0.14	9.26

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
4.10	94.64	0.34	9.60	5.40	91.14	0.25	13.10
4.15	94.43	0.21	9.81	5.45	90.87	0.27	13.37
4.20	94.38	0.05	9.86	5.50	90.61	0.26	13.63
4.25	94.17	0.21	10.07	5.55	90.28	0.33	13.96
4.30	93.98	0.19	10.26	6.00	90.05	0.23	14.19
4.35	93.77	0.21	10.47	6.05	89.74	0.31	14.50
4.40	93.59	0.18	10.65	6.10	89.41	0.33	14.83
4.45	93.39	0.20	10.85	6.15	89.01	0.40	15.23
4.50	93.22	0.17	11.02	6.20	88.65	0.36	15.59
4.55	93.04	0.18	11.20	6.25	88.38	0.27	15.86
5.00	92.85	0.19	11.39	6.30	88.08	0.30	16.16
5.05	92.71	0.14	11.53	6.35	87.82	0.26	16.42
5.10	92.28	0.43	11.96	6.40	87.65	0.17	16.59
5.15	92.18	0.10	12.06	6.45	87.30	0.35	16.94
5.20	91.93	0.25	12.31	6.50	87.08	0.22	17.16
5.25	91.73	0.20	12.51	6.55	86.89	0.19	17.35
5.30	91.61	0.12	12.63	7.00	86.68	0.21	17.56
5.35	91.39	0.22	12.85	7.05	86.62	0.06	17.62
Total firing time = 25,500 วินาที							

ตารางภาคผนวก ง.38 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1(1 h)	0	35.0	35.2	35.6	35.3
	3	50.0	50.9	50.2	50.4
	6	58.3	59.0	58.1	58.5
	9	71.4	71.3	72.6	71.8
2(2 h)	0	34.1	33.7	33.5	50.7
	3	44.2	45.1	45.4	44.9
	6	55.2	55.8	55.7	55.6
	9	65.1	66.2	66.6	66.0
3(3 h)	0	32.9	32.9	32.9	32.9
	3	42.2	42.5	42.2	42.3
	6	51.1	50.9	50.3	50.8
	9	58.0	57.6	57.1	57.6
4(4 h)	0	30.1	30.9	30.4	30.5
	3	38.8	38.4	37.3	38.2
	6	45.8	46.7	45.5	46.0
	9	53.1	53.9	53.2	53.4
5(5 h)	0	31.0	32.1	32.4	31.8
	3	37.0	37.9	38.7	37.9
	6	45.6	46.6	46.8	46.3
	9	51.2	52.4	52.1	51.9
6(6 h)	0	30.5	30.8	29.3	30.2
	3	51.5	52.0	51.7	51.7
	6	68.4	69.3	68.3	68.7
	9	80.1	81.2	80.0	80.4
7(7 h)	0	31.0	31.3	31.1	31.1
	3	44.7	44.5	44.6	44.6
	6	54.2	54.9	54.1	54.4
	9	67.8	67.6	67.8	67.7

ตารางภาคผนวก ง.39 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	1 h	14.00	6.50	246.4
2	2 h	14.00	6.50	196.1
3	3 h	14.50	5.00	156.7
4	4 h	14.50	5.00	114.6
5	5 h	15.00	4.00	113.2
6	6 h	9.00	10.00	163.5
7	7 h	13.00	6.00	125.1



เตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 มิลลิเมตร อัตราไหล่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 5.0×10^{-5} กิโลกรัม
ต่อวินาที (D550F21)

ตารางภาคผนวก ง.40 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
0	104.96	0	0.00	2.05	100.17	0.24	4.79
5	104.80	0.16	0.16	2.10	99.98	0.19	4.98
10	104.62	0.18	0.34	2.15	99.85	0.13	5.11
15	104.46	0.16	0.50	2.20	99.51	0.34	5.45
20	104.28	0.18	0.68	2.25	99.28	0.23	5.68
25	104.11	0.17	0.85	2.30	99.03	0.25	5.93
30	103.97	0.14	0.99	2.35	98.80	0.23	6.16
35	103.81	0.16	1.15	2.40	98.59	0.21	6.37
40	103.63	0.18	1.33	2.45	98.36	0.23	6.60
45	103.47	0.16	1.49	2.50	98.16	0.20	6.80
50	103.29	0.18	1.67	2.55	97.95	0.21	7.01
55	103.13	0.16	1.83	3.00	97.73	0.22	7.23
60	102.97	0.16	1.99	3.05	97.51	0.22	7.45
1.05	102.79	0.18	2.17	3.10	97.26	0.25	7.70
1.10	102.59	0.20	2.37	3.15	97.20	0.06	7.76
1.15	102.34	0.25	2.62	3.20	96.87	0.33	8.09
1.20	102.13	0.21	2.83	3.25	96.62	0.25	8.34
1.25	101.94	0.19	3.02	3.30	96.37	0.25	8.59
1.30	101.70	0.24	3.26	3.35	96.19	0.18	8.77
1.35	101.50	0.20	3.46	3.40	95.59	0.60	9.37
1.40	101.28	0.22	3.68	3.45	95.73	-0.14	9.23
1.45	101.06	0.22	3.90	3.50	95.51	0.22	9.45
1.50	100.84	0.22	4.12	3.55	95.31	0.20	9.65
1.55	100.65	0.19	4.31	4.00	95.09	0.22	9.87
2.00	100.41	0.24	4.55	4.05	94.89	0.20	10.07

เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม	เวลา	นน.รวม Reactor (กิโลกรัม)	อัตราการ เผาไหม้ (กิโลกรัม)	รวม
4.10	94.67	0.22	10.29	5.30	90.27	0.37	14.69
4.15	94.26	0.41	10.70	5.35	89.95	0.32	15.01
4.20	93.97	0.29	10.99	5.40	89.55	0.40	15.41
4.25	93.72	0.25	11.24	5.45	89.10	0.45	15.86
4.30	93.67	0.05	11.29	5.50	88.74	0.36	16.22
4.35	93.48	0.19	11.48	5.55	88.47	0.27	16.49
4.40	93.25	0.23	11.71	6.00	88.38	0.09	16.58
4.45	93.05	0.20	11.91	6.05	87.97	0.41	16.99
4.50	92.82	0.23	12.14	6.10	87.68	0.29	17.28
4.55	92.57	0.25	12.39	6.15	87.39	0.29	17.57
5.00	92.35	0.22	12.61	6.20	87.16	0.23	17.80
5.05	92.08	0.27	12.88	6.25	86.87	0.29	18.09
5.10	91.84	0.24	13.12	6.30	86.68	0.19	18.28
5.15	91.58	0.26	13.38	6.35	86.43	0.25	18.53
5.20	91.04	0.54	13.92	6.40	86.38	0.05	18.58
5.25	90.64	0.40	14.32	Total firing time = 24,000 วินาที			

ตารางภาคผนวก ง.41 การต้มน้ำ (Water Boiling Test)

ครั้งที่	เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
		T1	T2	T3	เฉลี่ย
1 (1 h)	0	31.0	31.8	31.8	31.5
	3	41.1	41.7	41.3	41.4
	6	55.1	55.5	55.4	55.3
	9	68.1	69.8	69.1	69.0
2 (2 h)	0	29.0	29.3	29.1	43.7
	3	40.1	40.9	40.4	40.5
	6	52.3	52.7	52.1	52.4
	9	62.3	62.2	62.1	62.2
3 (3 h)	0	28.3	28.1	28.3	28.2
	3	38.0	38.8	38.6	38.5
	6	49.1	49.4	49.0	49.2
	9	60.1	60.8	60.0	60.3
4 (4 h)	0	30.9	30.0	30.4	30.4
	3	36.3	36.3	37.0	36.5
	6	49.2	49.8	49.4	49.5
	9	62.3	62.3	62.9	62.5
5 (5 h)	0	30.9	30.3	30.5	30.6
	3	42.0	42.5	42.3	42.3
	6	53.2	53.7	53.7	53.5
	9	64.0	64.9	64.3	64.4
6 (6 h)	0	30.0	30.8	30.1	30.3
	3	53.2	53.5	53.1	53.3
	6	78.7	78.9	78.7	78.8
	9	91.1	91.3	91.6	91.3
7 (7 h)	0	27.9	27.7	27.8	27.8
	3	48.1	48.5	48.0	48.2
	6	64.0	64.5	64.1	64.2
	9	78.0	78.7	78.5	78.4

ตารางภาคผนวก ง.42 การวัดปล่อยเตา

ครั้งที่	เวลา	%O ₂	%CO ₂	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	1 h	14.00	10.50	114.4
2	2 h	14.50	7.50	132.3
3	3 h	15.00	6.50	91.5
4	4 h	15.00	6.00	116.2
5	5 h	15.50	5.00	109.2
6	6 h	7.50	12.50	194.9
7	7 h	12.50	8.00	178.1

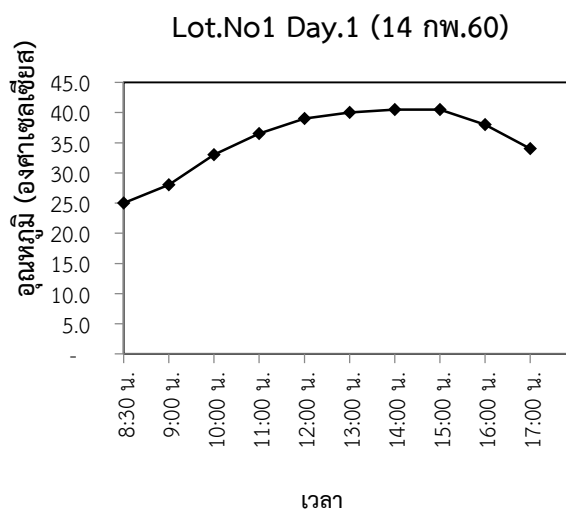




ภาคผนวก จ
ข้อมูลการตากแห้งขี้เลื่อย

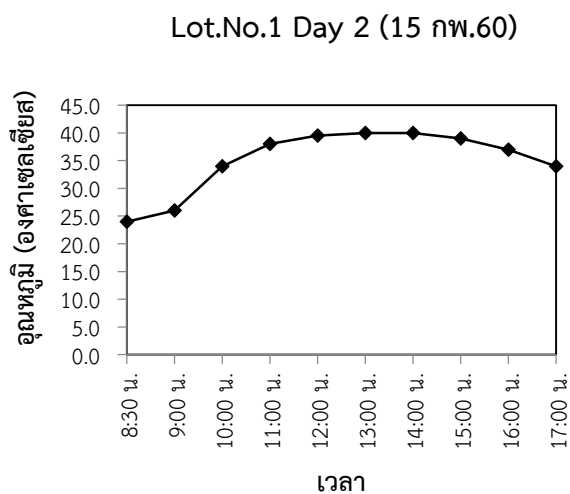
ตารางภาคผนวก จ. 1 Lot.No.1 วันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 น.	25.0
9:00 น.	28.0
10:00 น.	33.0
11:00 น.	36.5
12:00 น.	39.0
13:00 น.	40.0
14:00 น.	40.5
15:00 น.	40.5
16:00 น.	38.0
17:00 น.	34.0



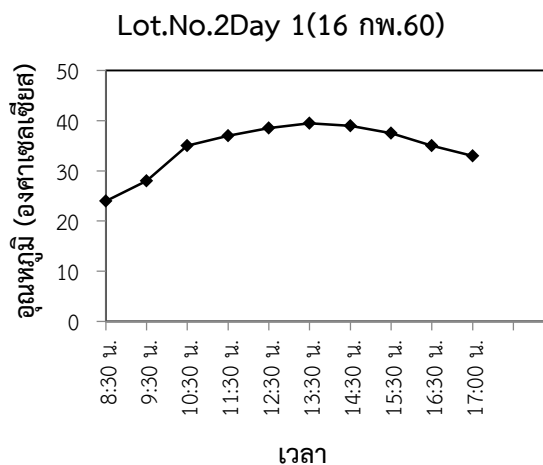
ตารางภาคผนวก จ. 2 Lot.No.1 วันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 น.	24.0
9:00 น.	26.0
10:00 น.	34.0
11:00 น.	38.0
12:00 น.	39.5
13:00 น.	40.0
14:00 น.	40.0
15:00 น.	39.0
16:00 น.	37.0
17:00 น.	34.0



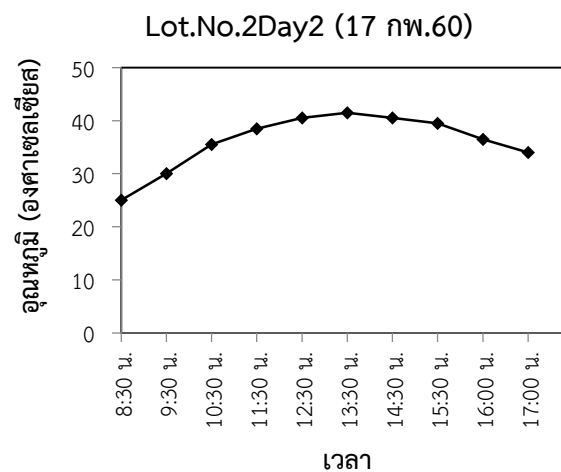
ตารางภาคผนวก จ. 3 Lot.No.2 วันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 น.	24
9:30 น.	28
10:30 น.	35
11:30 น.	37
12:30 น.	38.5
13:30 น.	39.5
14:30:00	39
15:30 น.	37.5
16:30 น.	35
17:00 น.	33



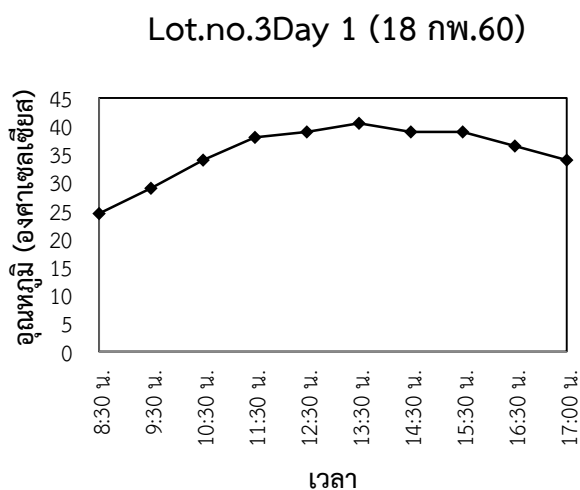
ตารางภาคผนวก จ. 4 Lot.No.2 วันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 น.	25
9:30 น.	30
10:30 น.	35.50
11:30 น.	38.5
12:30 น.	40.5
13:30 น.	41.5
14:30 น.	40.5
15:30 น.	39.5
16:00 น.	36.5
17:00 น.	34



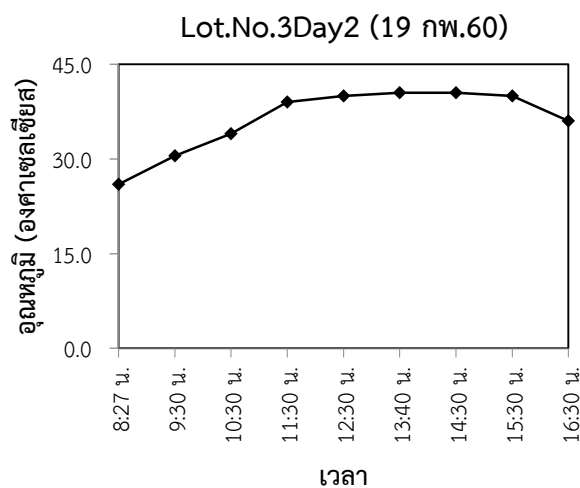
ตารางภาคผนวก จ. 5 Lot.No.3 วันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 น.	24.5
9:30 น.	29
10:30 น.	34
11:30 น.	38
12:30 น.	39
13:30 น.	40.5
14:30 น.	39
15:30 น.	39
16:30 น.	36.5
17:00 น.	34



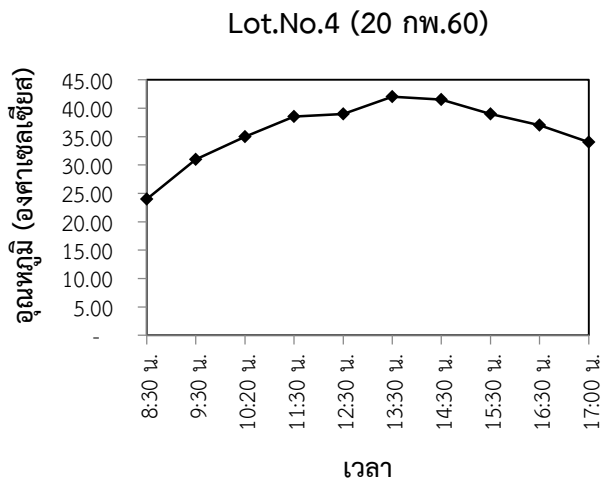
ตารางภาคผนวก จ.6 Lot.No.3 วันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:27 น.	26.0
9:30 น.	30.5
10:30 น.	34.0
11:30 น.	39.0
12:30 น.	40.0
13:40 น.	40.5
14:30 น.	40.5
15:30 น.	40.0
16:30 น.	36.0
17:00 น.	34.0



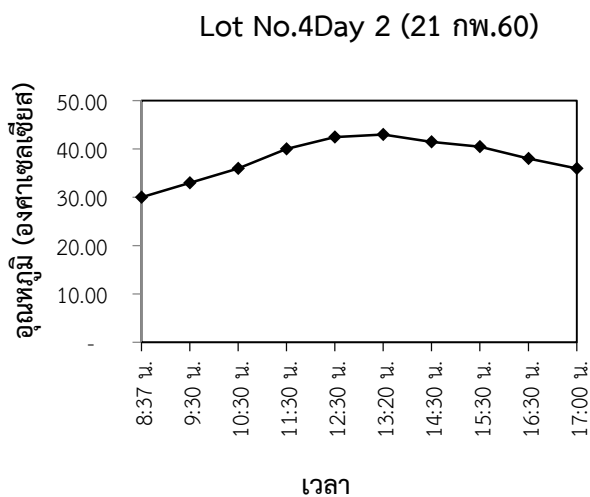
ตารางภาคผนวก จ.7 Lot.No.4 วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 น.	24.00
9:30 น.	31.00
10:20 น.	35.00
11:30 น.	38.50
12:30 น.	39.00
13:30 น.	42.00
14:30 น.	41.50
15:30 น.	39.00
16:30 น.	37.00
17:00 น.	34.00



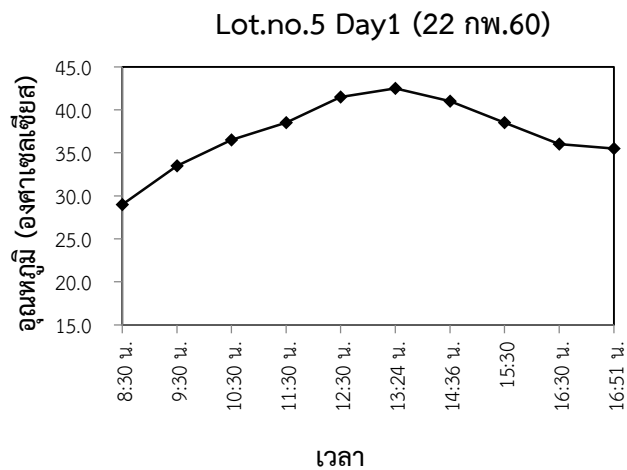
ตารางภาคผนวก จ.8 Lot.No.4 วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:37 น.	30.00
9:30 น.	33.00
10:30 น.	36.00
11:30 น.	40.00
12:30 น.	42.50
13:20 น.	43.00
14:30 น.	41.50
15:30 น.	40.50
16:30 น.	38.00
17:00 น.	36.00



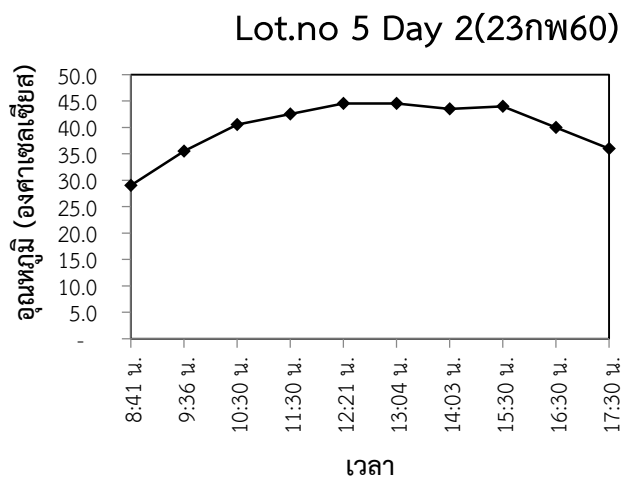
ตารางภาคผนวก จ.9 Lot.No.5 วันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 น.	29.0
9:30 น.	33.5
10:30 น.	36.5
11:30 น.	38.5
12:30 น.	41.5
13:24 น.	42.5
14:36 น.	41.0
15:30 น.	38.5
16:30 น.	36.0
16:51 น.	35.5



ตารางภาคผนวก จ.10 Lot.No.5 วันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2560

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:41 น.	29.0
9:36 น.	35.5
10:30 น.	40.5
11:30 น.	42.5
12:21 น.	44.5
13:04 น.	44.5
14:03 น.	43.5
15:30 น.	44.0
16:30 น.	40.0
17:30 น.	36.0





ตัวอย่างการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยมวล (mass mean diameter, \bar{D}_w)

$$\bar{D}_w = \sum_{i=1}^n (x_i \bar{D}_{pi}) \quad (ฉ.1)$$

เมื่อ \bar{D}_w คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยอัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นที่ (mm)

x_i คือ อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคในตะแกรงลำดับที่ i

\bar{D}_{pi} คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่ค้างในตะแกรงลำดับที่ i (mm)

$$x_i = \frac{m_i}{m_T} \quad (ฉ.2)$$

เมื่อ m_i คือ มวลของอนุภาคที่ค้างในตะแกรงลำดับที่ i (g)

m_T คือ มวลของอนุภาคทั้งหมด (g)

$$\bar{D}_{pi} = \frac{(D_{pi}) + (D_{pi+1})}{2} \quad (ฉ.3)$$

เมื่อ D_{pi} คือ ขนาดรูเปิดของตะแกรงลำดับที่ i ซึ่งเป็นตะแกรงที่อนุภาคค้างอยู่ (mm)

D_{pi+1} คือ ขนาดรูเปิดของตะแกรงที่อนุภาคผ่านหรือตะแกรงที่อยู่ข้างบนตะแกรงลำดับที่ i (mm)

ตารางภาคผนวก ฉ.1 ซ้ำน้ำหนักของตะแกรง

Mesh (micron)	D _{pi}	น้ำหนักของตะแกรง (กรัม)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
3350	3.350	258.72	258.74	258.76
1700	1.700	306.84	306.82	306.83
850	0.850	264.58	264.58	264.58
600	0.600	254.06	254.09	254.10
450	0.450	225.74	225.75	225.73
300	0.300	205.02	205.00	205.01
212	0.212	193.17	193.15	193.15
150	0.150	187.06	187.04	187.04
106	0.106	178.70	178.70	178.67
75	0.075	175.47	175.46	175.45
53	0.053	173.58	173.59	173.58
pan	-	300.36	300.31	300.34

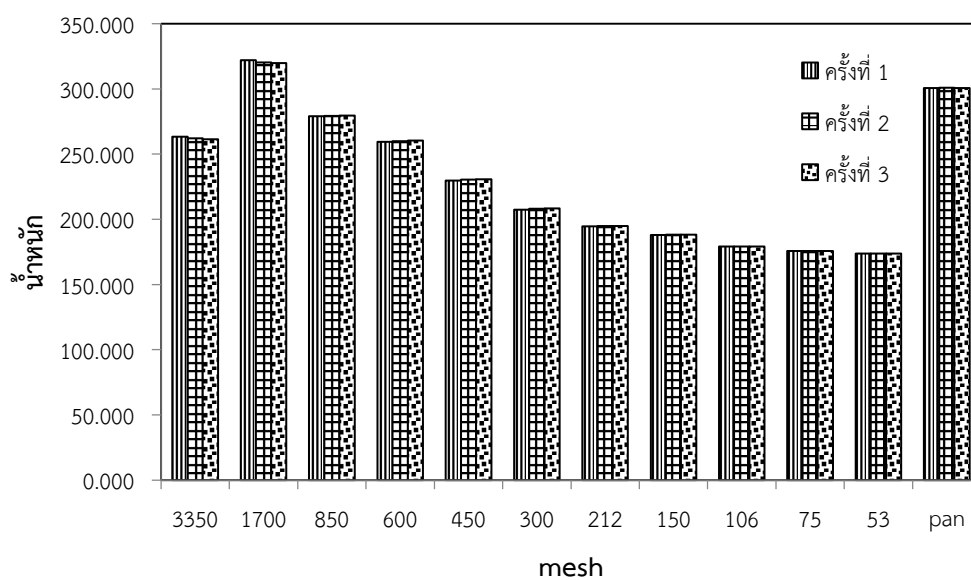
ตารางภาคผนวก ฉ.2 ซ้ำน้ำหนักของตะแกรงกับตัวอย่าง

Mesh (micron)	D _{pi}	น้ำหนักของตะแกรงกับตัวอย่าง (กรัม)					
		ครั้งที่ 1	นน.สะสม	ครั้งที่ 2	นน.สะสม	ครั้งที่ 3	นน.สะสม
3350	3.350	263.310	263.310	262.220	262.220	261.300	261.300
1700	1.700	322.110	585.420	320.270	582.490	319.930	581.230
850	0.850	279.110	864.530	279.200	861.690	279.640	860.870
600	0.600	259.520	1124.050	260.030	1121.720	260.470	1121.340
450	0.450	229.740	1353.790	230.500	1352.220	230.820	1352.160
300	0.300	207.470	1561.260	208.120	1560.340	208.290	1560.450
212	0.212	194.550	1755.810	194.980	1755.320	194.980	1755.430
150	0.150	187.970	1943.780	188.260	1943.580	188.170	1943.600
106	0.106	179.120	2122.900	179.190	2122.770	179.030	2122.630
75	0.075	175.780	2298.680	175.830	2298.600	175.790	2298.420
53	0.053	173.810	2472.490	173.830	2472.430	173.780	2472.200
pan	-	300.800		300.830		300.750	

ตารางภาคผนวก ฉ.3 หาน้ำหนักของตัวอย่าง (m_i)

น้ำหนักของตัวอย่าง = น้ำหนักของตะแกรงกับตัวอย่าง - น้ำหนักของตะแกรง

Mesh (micron)	D_{pi}	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
3350	3.350	4.59	3.48	2.54
1700	1.700	15.27	13.45	13.10
850	0.850	14.53	14.62	15.06
600	0.600	5.46	5.94	6.37
450	0.450	4.00	4.75	5.09
300	0.300	2.45	3.12	3.28
212	0.212	1.38	1.83	1.83
150	0.150	0.91	1.22	1.13
106	0.106	0.42	0.49	0.36
75	0.075	0.31	0.37	0.34
53	0.053	0.23	0.24	0.20
pan	-	0.44	0.52	0.41
Sum =		49.99	50.03	49.71



ตารางภาคผนวก ฉ.4 หาอัตราส่วนโดยมวลของน้ำหนัที่ค้ำงบนตะแกรง (X_i)

อัตราส่วนโดยมวลของน้ำหนั = น้ำหนัของตัวอย่าง/น้ำหนักรวม

Mesh (micron)	D_{pi}	X_i		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
3350	3.350	0.0918	0.0696	0.0511
1700	1.700	0.3055	0.2688	0.2635
850	0.850	0.2907	0.2922	0.3030
600	0.600	0.1092	0.1187	0.1281
450	0.450	0.0800	0.0949	0.1024
300	0.300	0.0490	0.0624	0.0660
212	0.212	0.0276	0.0366	0.0368
150	0.150	0.0182	0.0244	0.0227
106	0.106	0.0084	0.0098	0.0072
75	0.075	0.0062	0.0074	0.0068
53	0.053	0.0046	0.0048	0.0040

ตารางภาคผนวก ฉ.5 หาค่า D_{pi}

โดย D_{pi} คือ ขนาดรูเปิดของตะแกรงลำดับที่ i ซึ่งเป็นตะแกรงที่อนุภาคค้ำงอยู่ (มม.)

D_{pi+1} คือ ขนาดรูเปิดของตะแกรงลำดับที่อยู่ข้างบนตะแกรงลำดับที่ i (มม.)

Mesh (micron)	D_{pi}	D_{pi+1}	D_{pi}	$X_i \cdot D_{pi}$		
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
3350	3.350	0.000	1.675	0.154	0.117	0.086
1700	1.700	3.350	2.525	0.771	0.679	0.665
850	0.850	1.700	1.275	0.371	0.373	0.386
600	0.600	0.850	0.725	0.079	0.086	0.093
450	0.450	0.600	0.525	0.042	0.050	0.054
300	0.300	0.450	0.375	0.018	0.023	0.025
212	0.212	0.300	0.256	0.007	0.009	0.009
150	0.150	0.212	0.181	0.003	0.004	0.004
106	0.106	0.150	0.128	0.001	0.001	0.001
75	0.075	0.106	0.091	0.001	0.001	0.001
53	0.053	0.075	0.064	0.000	0.000	0.000
pan	0.000	0.053	0.027	0.000	0.000	0.000

ตารางภาคผนวก ฉ.6 หาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยมวล (\bar{D}_w)

$$\bar{D}_w = \text{ผลรวมของ } (X_i \cdot D_{pi}) \times 1,000$$

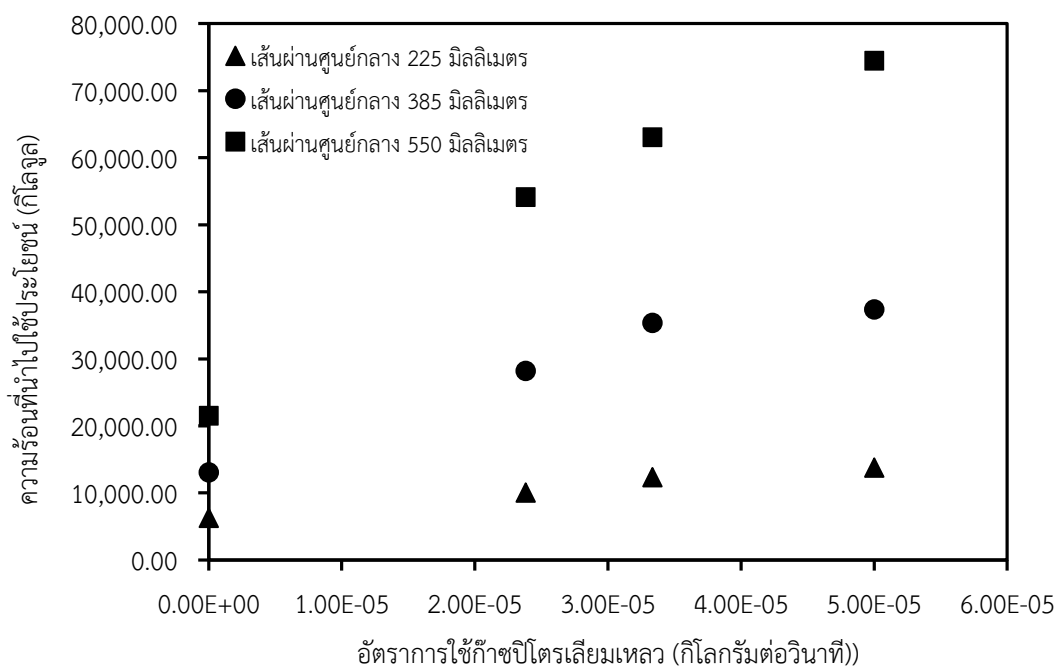
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1447.773	1343.507	1324.231	1371.837

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยมวล } (\bar{D}_w) = (1447.773 - 1324.231) / 2 + 1324.231$$

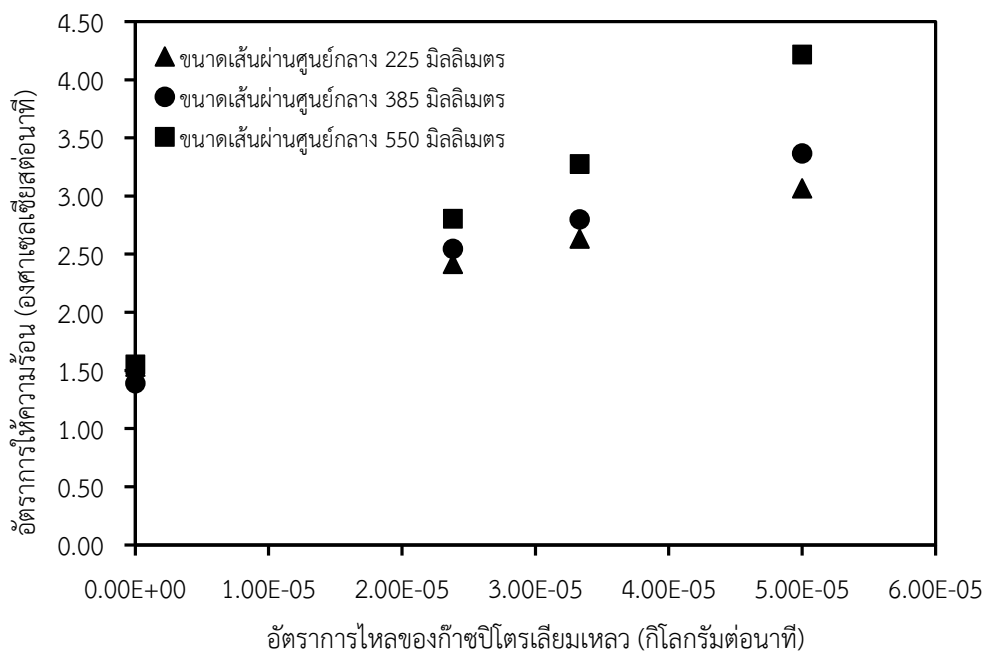
$$= 1,386 \mu\text{m}$$





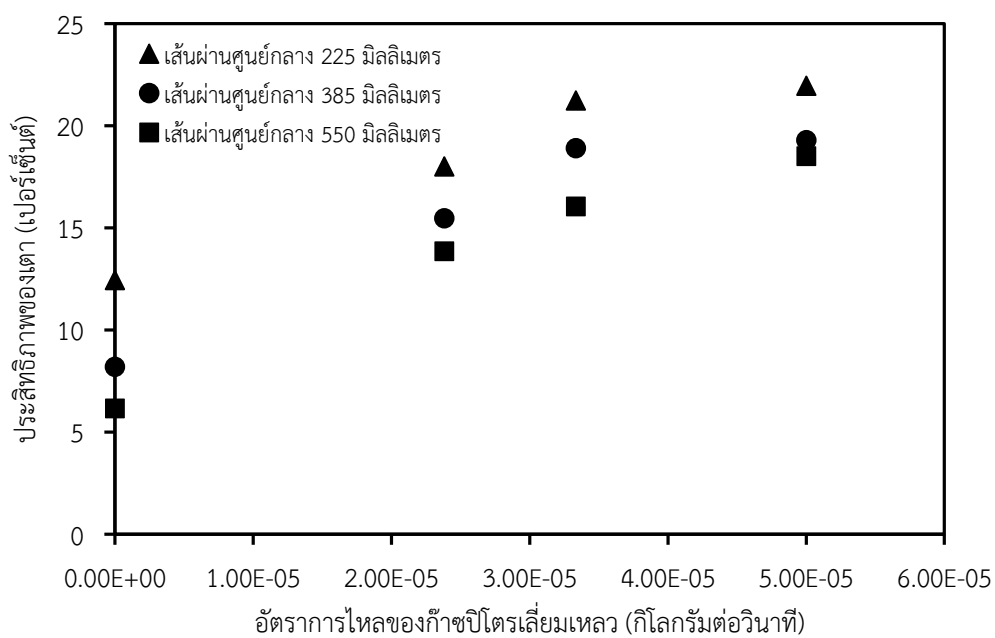
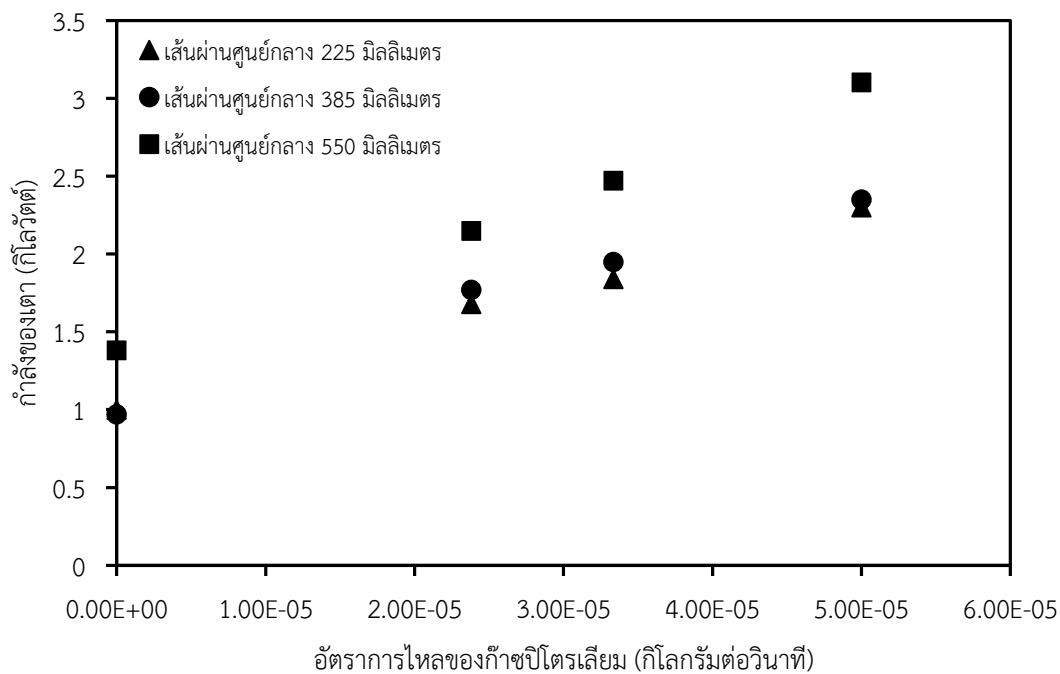


รูปภาพผนวก ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ และอัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว



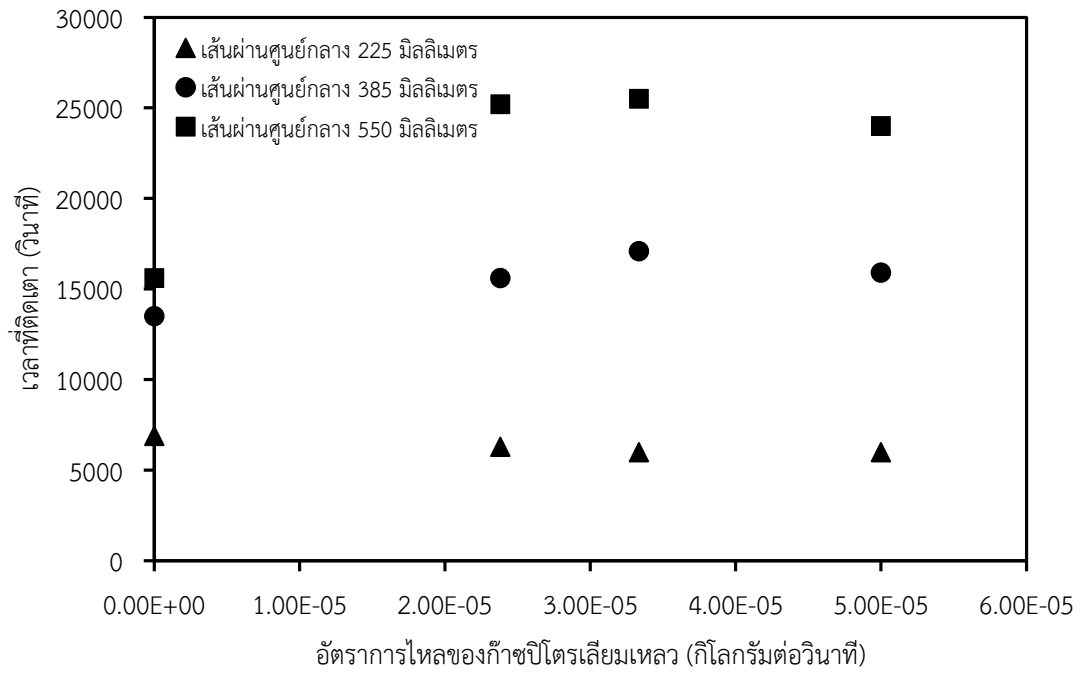
รูปภาพผนวก ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้ความร้อน และอัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเตา และอัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

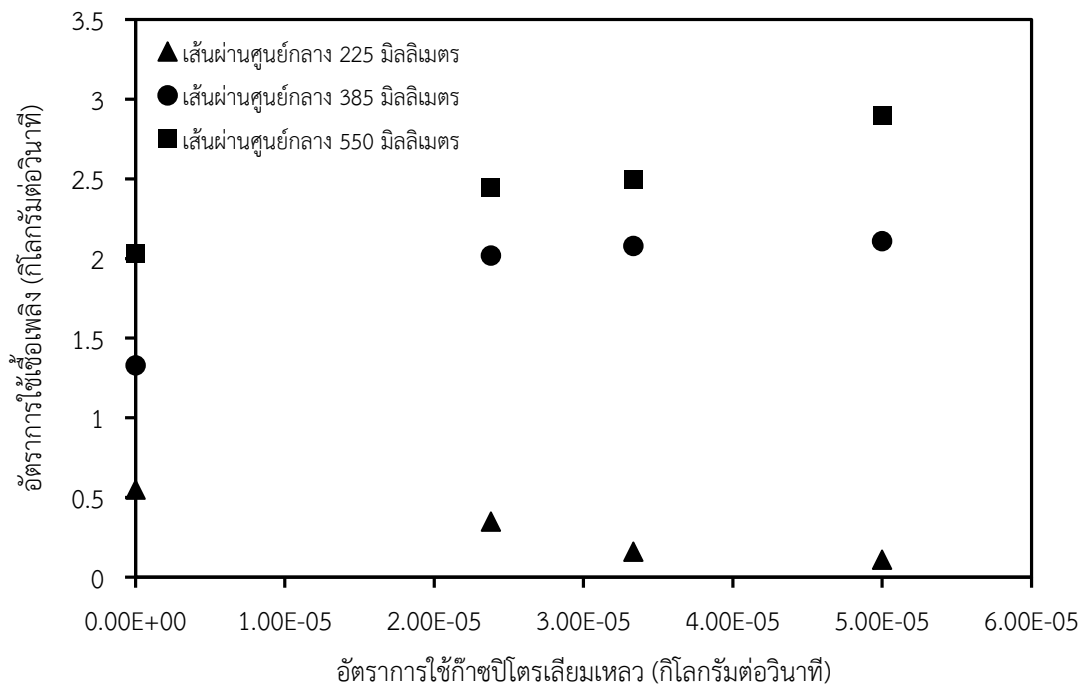


รูปภาพผนวก ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเตา และอัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียม

เหลว



รูปภาพผนวก ช.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ติดเตา และอัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว



รูปภาพผนวก ช.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้เชื้อเพลิง และอัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นพพล จินาไหม
วัน เดือน ปี เกิด	20 กุมภาพันธ์ 2503
สถานที่เกิด	ชุมพร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2513-2515 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนสวีวิทยา พ.ศ. 2516-2518 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนสวีวิทยา พ.ศ. 2519-2522 ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป (เคมี-สวีวิทยา) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

