



รายงานการวิจัย เรื่อง

การศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น
The Study of Thermal Efficiency of Pilot Scale rotary Kiln for Torrefaction Process

ชื่อผู้วิจัย (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธาราวดี
อาจารย์ ดร.ณัฐ รัชยะพงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระนุช อินทะกันท์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
สำนักงานบริหารการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์
มหาวิทยาลัยศิลปากร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

ปีที่ดำเนินการเสร็จ พ.ศ. 2563

แบบฟอร์มบทคัดย่อ

ภาษาไทย

ส่วนที่ 1

ชื่อโครงการ การศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

- ชื่อผู้วิจัย 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธาราวดี (หัวหน้าโครงการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร
2. อาจารย์ ดร.ณัฐ รัชยะพงษ์ (ผู้ร่วมวิจัย)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระนุช อินทะกันท์ (ผู้ร่วมวิจัย)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร

แหล่งทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2561

สำนักงานบริหารการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีที่เสร็จ 2563

ประเภทการวิจัย การวิจัยพื้นฐาน / การวิจัยประยุกต์ / การพัฒนาทดลอง

สาขาวิชา (อ้างอิงตามวช.) สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
พื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์

ส่วนที่ 2 บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอรีไฟร์และประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาแบบหมุน ในงานวิจัยนี้จะใช้ชีวมวลทั้งหมด 3 ชนิด คือ กะลาปาล์ม ชังข้าวโพดและ แกลบ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิ และความเร็วรอบในการหมุนเตาเผา ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอรีไฟร์ และประสิทธิภาพทางความร้อน เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ (ยาว 6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร) เชื้อเพลิงอัดก้อนถูกนำมาใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน การไหลภายในเตาเป็นแบบไหลสวนทางกันระหว่างชีวมวลและความร้อน ในสภาวะไร้ออกซิเจน มุมของเตาในการวิจัยคือ 2 องศา อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่ใช้คือ 230 ± 5 , 250 ± 5 และ 270 ± 5 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนเตาคือ 1, 2 และ 3 rpm จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าชีวมวลหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าชีวมวลดิบ เมื่ออุณหภูมิการทอรีแฟคชั่นเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความชื้นก็จะลดลง ค่าผลได้เชิงมวลลดลง พบว่าค่าความร้อนสูญเสียที่มากที่สุดคือค่าความร้อนสูญเสียที่ผนังของเตาเผาแบบหมุน และพบว่าอุณหภูมิของแก๊สไอเสียสามารถนำไปใช้ในการอบแห้งชีวมวลอัดก้อนได้

คำสำคัญ : เตาเผาแบบหมุน, กระบวนการทอรีแฟคชั่น, ค่าความร้อนสูญเสีย

ภาษาอังกฤษ

ส่วนที่ 1

Research Title The Study of Thermal Efficiency of Pilot Scale rotary Kiln for Torrefaction Process.

Researcher Asst. Prof. Dr. Nattawut Tharawadee (Project Leader)

Faculty of engineering and industrial technology Silpakorn University

Researcher Nat Thuchayapong (Co-Researcher)

Faculty of engineering and industrial technology Silpakorn University

Researcher Asst. Prof. Dr. Weeranut intagun(Co-Researcher)

Faculty of engineering and industrial technology Silpakorn University

Research Grants Fiscal Year 2018 ,

Silpakorn University Research, Innovation and Creativity Administration Office

Year of completion 2020

Type of research basic research / applied research / experimental development

Subjects (based NRCT).....

ส่วนที่ 2

Abstract

This research studies the effect of torrefaction process by using a rotary kiln on torrefied biomass properties and thermal efficiency of rotary kiln. Palm kernel shell, corn crop and rice husk are used in this research. In this research the effect of torrefaction temperature and rotation speed of the rotary kiln on properties of torrefied biomass and thermal efficiency are investigated. The torrefaction rotary kiln (6 meters length and 0.3 meters diameter) is used in this research. The biomass briquette is used for the heat source. The oxygen-free atmosphere and counter current flow were control in this experimental. The inclination of kiln is around 2 degrees. The temperature of chamber is at 230 ± 5 , 250 ± 5 and 270 ± 5 °C respectively. The rotational speed is at 1, 2 and 3 rpm. In conclusion, the biomass properties after torrefaction process were improve when the temperature was increased, the moisture content and mass yield were decreased. It was found that, the highest thermal loss was loss form wall. The temperature of exhaust gas form rotary kiln can dry the biomass briquette.

Key words: rotary kiln, torrefaction process, thermal loss

สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ชีวมวล	3
2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล	3
2.1.1.1 เซลลูโลส	3
2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส	4
2.1.1.3 ลิกนิน	4
2.1.1.4 แป้ง	4
2.1.1.5 โปรตีน	4
2.1.1.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)	4
2.1.2 ปริมาณของชีวมวลในประเทศไทย	4
2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของเชื้อเพลิงชีวมวล	6
2.1.3.1 ข้อดีของชีวมวล	6
2.1.3.2 ข้อเสียของชีวมวล	6
2.2 การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล	7
2.2.1 กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical conversion)	7
2.2.2 กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical conversion)	7
2.2.3 กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion)	7
2.3 กระบวนการทอรีแฟกชัน (Torrefaction)	7
2.3.1 หลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟกชัน	10
2.3.2 ผลของชีวมวลที่ผ่านการกระบวนการทอรีแฟกชัน (Torrefaction)	12
2.3.2.1 ค่าความร้อน	12
2.3.2.2 ค่าความชื้น	13
2.3.2.3 ความหนาแน่นบดอัด	14
2.3.2.4 ค่าความทนทาน	15

2.3.2.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	16
2.3.2.6 ความไม่ชอบน้ำ	16
2.3.2.7 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ	17
2.4 เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln)	17
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเตาเผาแบบหมุน	17
2.4.2 ชนิดของเตาเผาแบบหมุน	17
2.4.2.1 เตาเผาแบบเปียก (Wet Kilns)	17
2.4.2.2 เตาเผาแบบแห้งชนิดยาว (Long Dry Kilns)	18
2.4.2.3 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kiln)	19
2.4.2.4 เตาเผาแบบคูลเลอร์และเครื่องเป่า (Cooler and Dryer Kilns)	19
2.4.2.5 เตาเผาแบบให้ความร้อนภายนอก (Indirect fired Kiln)	20
2.4.3 ส่วนประกอบของเตาเผาแบบหมุน	21
2.4.3.1 ห้องเผาไหม้	21
2.4.3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อนเตาเผา	22
2.4.3.3 แหล่งความร้อน	22
2.4.3.4 ไบควอน	22
2.4.4 การใช้งานเตาเผาแบบหมุน	23
2.4.5 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุน	23
2.5 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น	24
2.6 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็ก	25
2.6.1 หลักการวิเคราะห์โดยทั่วไปในการหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์	26
คำสำคัญ	29
ตัวแปรต้น	29
ตัวแปรตาม	29
ตัวแปรควบคุม	29
3. วิธีการดำเนินงาน	30
3.1 การเตรียมเชื้อเพลิง	30
3.2 การติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆของเตาเผาแบบหมุน	30
3.3 ขั้นตอนการเผาเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล	30
3.4 ขั้นตอนการเก็บอุณหภูมิของเตาเผาแบบหมุนที่จุดต่างๆ	31

3.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาแบบหมุน	31
3.6	การวิเคราะห์ต้นทุน	33
3.7	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน	34
4.	ผลการดำเนินงานและอภิปรายผล	36
4.1	ค่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล	36
4.1.1	ค่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาแบบหมุนจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นแกลป์ที่ความเร็วรอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส	36
4.2	การอบชีวมวลด้วยแก๊สไอเสียจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น	48
4.3	ต้นทุนของกระบวนการทอรีแฟคชั่นโดยใช้เตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น	53
4.4	ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	57
4.5	ความชื้น	59
4.6	การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	60
4.6.1	แกลป์	60
4.6.1.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลป์ทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที	60
4.6.1.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลป์ทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส	62
4.6.2	ซังข้าวโพด	64
4.6.2.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที	64
4.6.2.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส	66
4.6.3	กะลาปาล์ม	68
4.6.3.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที	68
4.6.3.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส	70
4.7	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน	73
4.7.1	แกลป์	73

4.7.1.1	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	73
4.7.1.2	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	74
4.7.1.3	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที	75
4.7.1.4	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไพร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 230 องศาเซลเซียส	76
4.7.1.5	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไพร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส	77
4.7.1.6	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไพร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 270 องศาเซลเซียส	78
4.7.2	ซังข้าวโพด	80
4.7.2.1	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	80
4.7.2.2	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	81
4.7.2.3	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที	82
4.7.2.4	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไพร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 230 องศาเซลเซียส	83
4.7.2.5	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไพร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส	84
4.7.2.6	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไพร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 270 องศาเซลเซียส	85
4.7.3	กะลาปาล์ม	87
4.7.3.1	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	87
4.7.3.2	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไพร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	88

4.7.3.3	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็รรอบ 3 รอบต่อนาที	89
4.7.3.4	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส	90
4.7.3.5	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	91
4.7.3.6	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส	92

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องด้วยปัญหาทางเศรษฐกิจและวิกฤตด้านพลังงานโลกในปัจจุบัน ทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานซึ่งได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน [1] เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ทันกับความต้องการในการใช้พลังงานที่มากขึ้นเนื่องจากต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิตภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาพลังงานทางเลือก (Alternative energy) ชนิดใหม่มาใช้ทดแทน เช่น พลังงานจากชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากอินทรีย์สารของพืชชนิดต่างๆ ได้แก่ พืชเกษตรกรรม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เศษไม้ ฯลฯ โดยใช้กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง การผลิตก๊าซ การหมักและการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช โดยคุณสมบัติที่สำคัญของพลังงานทางเลือกคือเป็นพลังงานสะอาดมีการปลดปล่อยก๊าซมลภาวะที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและสามารถสร้างทดแทนขึ้นใหม่ได้ตลอดเวลาในระยะเวลาอันสั้น

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรมจึงทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เนื่องด้วยปัจจัยทางด้านความแตกต่างของภูมิภาคและภูมิประเทศของประเทศไทยจึงทำให้ประเทศไทยสามารถผลิตพืชพันธุ์ทางการเกษตรได้หลากหลายชนิด ซึ่งผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หากนำเศษวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาผลิตเป็นพลังงานก็จะทำให้สามารถประหยัดต้นทุนในการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดก๊าซมลภาวะที่เกิดขึ้นในการผลิตพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ปัจจุบันทางภาครัฐและเอกชนได้มีการรณรงค์ให้ใช้พลังงานที่ผลิตได้เองในประเทศไทยโดยมีการคาดการณ์ว่าภายในระยะเวลา 10 ปีจะมีความสามารถผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลได้เพิ่มขึ้นถึง 25% [2]

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการนำชีวมวลที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ผลิตพลังงานกันอย่างแพร่หลายส่งผลให้ชีวมวลบางชนิดมีราคาสูงขึ้นและเกิดปัญหาขาดแคลนในบางท้องถิ่น เช่น แกลบ ชี้เลื้อย ฯลฯ แต่ยังคงพบว่าชีวมวลอีกจำนวนมากที่ยังไม่ถูกนำมาใช้ผลิตพลังงาน เช่น ฟางข้าวยอดอ้อยและใบอ้อย ทางปาล์ม น้ำมัน ลำต้นข้าวโพดเนื่องจากคุณสมบัติของชีวมวลดังกล่าวซึ่งเป็นวัสดุมวลเบาและมักจะถูกกองทิ้งไว้บริเวณพื้นที่เพาะปลูกภายหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ต้นทุนในการเก็บรวบรวมและขนส่งเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหากจะนำชีวมวลดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการผลิตพลังงาน จำเป็นต้องมีการศึกษาและกำหนดแนวทางในการเก็บรวบรวมตลอดจนบริหารจัดการชีวมวลดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การแปรรูปให้เป็นชีวมวลอัดเม็ด (Biomass Pellet) หรือเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความหนาแน่นให้กับชีวมวล ทำให้ต้นทุนการขนส่งเชื้อเพลิงลดลง

การปรับปรุงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทำลดข้อด้อยของชีวมวลเช่น การสับละเอียด การขึ้นรูป อีกทั้งกระบวนการทอรีไฟร์ที่ทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนที่สูงขึ้น มีความไม่ชอบน้ำ (ทำให้สามารถจัดเก็บได้สะดวกและอยู่ได้เป็นเวลานาน)

กระบวนการทอรีแฟกชัน (Torrefaction) เป็นกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีด้วยความร้อนที่มีค่าอยู่ในช่วง 220 - 300 องศาเซลเซียสในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนกระบวนการทอรีแฟกชัน (Torrefaction) ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮดรอกซิเลชัน (Dehydroxylation) และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ส่งผลต่อการลดลงของอัตราส่วนระหว่าง ออกซิเจน (O) ต่อคาร์บอน (C) และอัตราส่วนระหว่าง ไฮโดรเจน (H) ต่อคาร์บอน (C) เมื่อเทียบกับชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชัน (Torrefaction) ผลที่ได้คือ ค่าความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้น ส่งผลให้ชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟกชัน (Torrefaction) มีข้อจำกัดในด้านความชื้นลดลง ซึ่งประสิทธิภาพของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟกชัน (Torrefaction) วัดได้จากตัวแปรเหล่านี้ คือ ความชื้น สารระเหย ความหนาแน่น ค่าความร้อน คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของชีวมวล ซึ่งผลของตัวแปรขึ้นอยู่กับทางเลือกประเภทของเตาเผาและช่วงของอุณหภูมิ

เตาเผาทอรีไฟร์เป็นเตาเผาที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติชีวมวล แต่โดยมากเตาจะมีความไม่แน่นอนเชิงผลผลิตที่สูงมาก กล่าวคือผลผลิตที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอเนื่องจากเตาแบบทั่วไปโดยส่วนใหญ่ไม่สามารถที่จะทำให้ความร้อนกระจายเข้าสู่ชีวมวลได้อย่างทั่วถึง ซึ่งมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของชีวมวลเช่นกัน

เตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) เป็นเตาเผาที่มีความน่าสนใจในการใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายๆอุตสาหกรรม เช่น การเผาขยะ ปูนซีเมนต์ เป็นต้น ด้วยข้อดีคือสามารถทำให้ความร้อนกระจายสู่วัตถุดิบได้อย่างทั่วถึง สามารถปรับรูปแบบการทำงานได้อย่างหลากหลาย มีผลทำให้ผลผลิตที่ได้มีความสม่ำเสมอและมีคุณภาพที่สูงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในประเทศไทยมีการนำเตาเผาแบบหมุนมาใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลที่น้อยมาก ทำให้เรามองค้ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้และตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพที่น้อยมาก เนื่องมาจากลักษณะเชื้อเพลิงต่างชนิดในแต่ละงานวิจัยพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทอรีไฟร์เชื้อเพลิงชีวมวลในแต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาชีวมวลแบบหมุนขนาดเล็ก รวมไปถึงความร้อนสูญเสีย และสมดุลทางพลังงานของเตาเผาแบบหมุน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาแบบหมุนในกระบวนการทอรีไฟร์ โดยใช้เตาเผาชีวมวลแบบหมุนขนาดเล็ก ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาแบบหมุนที่ใช้ในกระบวนการทอรีไฟร์สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อปรับใช้กับชุมชน รัฐวิสาหกิจ และโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาค่าการสูญเสียความร้อนและสมดุลพลังงานของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาชีวมวลแบบหมุน
2. เตาเผาแบบหมุนให้ความร้อนจากเชื้อเพลิงอัดก้อน
3. ชีวมวลที่ใช้ในการกระบวนการทอรีแฟคชั่น 3 ชนิดคือ แกลบ กะลาปาล์ม และซังข้าวโพด
4. ใช้อุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่น 3 ค่า คือ 230 250 และ 270 °C
5. ใช้ความเร็วรอบในการทอรีแฟคชั่น 3 ค่า คือ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือสิ่งที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตเช่นต้นไม้ซานอ้อยมันสำปะหลังถ่านฟืนแกลบวัชพืชต่างๆ หรือแม้กระทั่งขยะและมูลสัตว์เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้อาจจะสามารถจำแนกแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 2 แหล่งดังนี้ ของเสียจากการประกอบการทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม อาทิเช่น ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ซานอ้อย เป็นต้น รวมไปถึงของเสียประเภทพลาสติกและกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และของเสียจากแหล่งชุมชน อาทิเช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ของเสียจากสัตว์ เช่น มูลสัตว์ เป็นต้น

2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

2.1.1.1 เซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ที่ติกูโคสถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิกซึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น (คือดีกรีของโพลีเมอร์ไรเซชันซึ่งมีความกว้างตั้งแต่หลายพันจนถึงหลายหมื่น จำนวนผลลัพธ์ของการไฮโรไลซิสเซลลูโลสคือ ดีกลูโคส(โมโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลลัพธ์เป็นไดแซคคาไรด์ (เซลลูไบโอส) และโพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีลำดับ $n=3$ ถึง 10 เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผนังและด้านทานต่อกรดและด่าง

2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีจำนวนยูนิตคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีไซโลสและดีอะราไบโนส และคาร์บอนกับ 6 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส ดีกาแลคโตสและดีกลูโคส โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 5 มีจำนวนมากกว่า โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 6 สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยคือ เนื่องจากดีกรีโพลิเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50-200 โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถละลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลสเป็นจำนวนมากสามารถละลายได้ในสารละลายเบส เฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือไซแลน ซึ่งประกอบด้วยไซโลสด้วยพันธะ 1,4

2.1.1.3 ลิกนิน

สารประกอบที่ประกอบด้วย ยูนิตฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ ซึ่งเชื่อมกันเป็นสามมิติโครงสร้างนั้นซับซ้อนและยังไม่มีโครงข่ายที่แท้จริง โครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลินทรีย์และสารเคมี นอกนั้นยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันร่วมกัน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ถูกพบอย่างสากในสารชีวมวลชนิดต่างๆและแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก

2.1.1.4 แป้ง

โพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของดีกลูโคส แต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟาไกลูโคไซด์ เนื่องจากความต่างของโครงสร้างพันธะ เซลลูโลสละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้ง จะละลายในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณ 10% - 20% ของแป้ง) และบางส่วนที่ไม่ละลาย แป้งถูกพบในเมล็ดธัญพืช และลำต้น ซึ่งถือเป็นอาหาร

2.1.1.5 โปรตีน

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกัน ขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของโพลิเมอร์ไรเซชัน โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่าสามสารข้างต้นที่กล่าวมา

2.1.1.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ มีได้หลากหลายขึ้นกับชนิดสารอินทรีย์ ที่มีจำนวนมากได้แก่ กลีเซอรอล (ตัวอย่าง เช่น น้ำมันผักกาดก้านขาว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ) และซูโครสในอ้อย[3]

2.1.2 ปริมาณของชีวมวลในประเทศไทย

นอกจากนี้ในการนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานต้องคำนึงถึงปริมาณที่มากพอต่อการแปรรูปจึงเหมาะกับประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ข้าว น้ำตาล ยางพารา น้ำมันปาล์ม และมันสำปะหลัง เป็นต้น และในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ จะมีวัสดุเหลือใช้ออกมาจำนวนหนึ่ง คือ ชีวมวล ที่มีปริมาณมหาศาลกระจายอยู่ทั่วประเทศ การกระจายตัวของแหล่งชีวมวลมีรูปแบบการกระจายตัวเป็น 2 ลักษณะ คือ อยู่รวมเป็นกลุ่มและอยู่กระจัดกระจายชีวมวลที่อยู่รวมเป็นกลุ่ม คือ

เศษชีวมวลจากกระบวนการแปรรูป ณ ที่ใดที่หนึ่ง เช่น โรงสีข้าว โรงงานผลิตน้ำตาลทราย โรงงานแปรงมัน สำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราเป็นต้น และที่อยู่กระจัดกระจายตามพื้นที่เพาะปลูกหรือไม่มีการรวบรวม เช่น การสีข้าวโพดโดยอุปกรณ์สีข้าวโพดที่เคลื่อนที่ได้ เศษไม้ปลายไม้จากสวนปายางพารา ใบอ้อยในไร่อ้อย ซึ่งชีวมวลในประเทศไทยปี 2552 มีปริมาณถึง 59,539,905.20 ตัน ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของชีวมวลในประเทศไทย

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้(ตัน)	ค่า ความ ร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ ใบ	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะล่าย เปล้า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใบ	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มัน สำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628,990.82	15.40	9,686.46	229.30
		กาบ	464,250.95	16.23	7,534.79	178.36
		กะลา	128,936.58	17.93	2,311.83	54.73
ไม้ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	145,853,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

จากตารางที่ 2.1 เห็นได้ว่ามีชีวมวลที่ยังไม่มีการนำไปใช้งานจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากชีวมวล 5 ชนิด เช่น ลำต้นและเหง้ามันสำปะหลัง ฟางข้าว ชังข้าวโพด ทางปาล์ม และยอดและใบอ้อย เป็นต้น เนื่องจากสามารถรวบรวมได้ง่ายในพื้นที่ และมีราคาถูก

2.1.3 ข้อดีและข้อเสียของเชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้นซึ่งจากต่างน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

2.1.3.1 ข้อดีของชีวมวล

- การนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้า จะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่ง หรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า

- ลดการใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ฟอสซิล ปิโตรเลียม เป็นต้น อีกทั้งเชื้อเพลิงจากชีวมวลหาได้ง่ายและถูกกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

- เป็นการลดขยะรวมถึงเพิ่มคุณค่าที่เหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรม เพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรที่ขายวัสดุให้กับโรงงาน เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุด

- ในชุมชนสามารถตั้งโรงไฟฟ้าขนาดเล็กได้เพื่อใช้เองและขายให้การไฟฟ้าหรือภาคอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับชุมชน

2.1.3.2 ข้อเสียของชีวมวล

- ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหารหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดทั้งปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อยมีจำกัดเพียงบางเดือน

- ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่าแหล่งพลังงานอื่นๆ จำพวกปิโตรเลียมและถ่านหิน

- ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูงเป็นปัญหาต่อการจัดเก็บ และส่งผลให้เป็นปัญหาในการเผาไหม้ เกิดการสูญเสียความร้อนและเกิดมลพิษสูง

- ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ จึงต้องใช้ในปริมาณที่มาก และต้องใช้อุปกรณ์ในการจัดเก็บ การเก็บรักษา การขนส่ง และการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่
 - รูปแบบกายภาพไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว ไม่สะดวกต่อการขนย้าย ตรวจสอบ เก็บรักษา
- จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า การนำชีวมวลมาประยุกต์ใช้ย่อมเกิดประโยชน์มากกว่าโทษด้วยเหตุผลหลายๆประการ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการลดข้อเสียดังกล่าวของชีวมวลให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพมีการกระทำกันด้วยกระบวนการและเทคนิคต่างๆอย่างแพร่หลาย เพื่อลดข้อเสียของชีวมวลให้มากที่สุด

2.2 การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล

การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล จะช่วยในการลดปริมาณความชื้นซึ่งส่งผลให้เพิ่มค่าความร้อนและมีความสะดวกในการเก็บรักษา และปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลให้สะดวกต่อการใช้ การปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆคือ

2.2.1 กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง การคัดแยก เฉพาะส่วน และการบีบคั้นน้ำมัน

2.2.2 กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical conversion) ที่ใช้กิจกรรมของ เชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยโดยปราศจากอากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวมวลและ กระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล

2.2.3 กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) โดยกระบวนการนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆได้อีกคือ การเผาไหม้ ไพโรไลซิส และก๊าซซิฟิเคชัน [4] ทั้งนี้ลักษณะและความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาพที่ใช้และวัตถุประสงค์ หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ ถึงแม้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีจะเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ค่อนข้างที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน เนื่องจากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลค่อนข้างมาก จึงทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่า ทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่หลากหลายกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี

2.3 กระบวนการทอริแฟกชัน (Torrefaction)

กระบวนการทอริแฟกชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) อย่างอ่อนที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ อุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยเพื่อไม่ให้ ชีวมวลเกิดการเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการ กระบวนการทอริแฟกชันนี้เป็นการปรับปรุงชีวมวล และยังช่วยลดข้อด้อยของชีวมวลได้จริง

ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อนต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น การดูความชื้นกลับลดลง และมีความกรอบทำให้ง่ายต่อการนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ ส่งผลให้สะดวกในการขนส่งและการเก็บรักษา ความชื้นลดลงและมีปริมาณพลังงานสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบ [5] ลดอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ความไม่ชอบน้ำ อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษาชีวมวลในปริมาณที่มากขึ้นด้วย

Jaya S. T. et.al., (2011) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟคชันชีวมวลเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลในเชิงของคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่น่าสนใจ กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นการให้ความร้อนกับชีวมวลอย่างช้าๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อย ในช่วงอุณหภูมิที่สูงที่สุด 300 องศาเซลเซียส กระบวนการทอรีแฟคชันสามารถที่จะกำหนดเป็นกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลมาจากการควบคุมในบางส่วนและการไพโรไลซิสชีวมวล จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 - 280 องศาเซลเซียส ดังนั้นกระบวนการนี้สามารถเรียกได้ว่าเป็นไพโรไลซิสอย่างเบาที่จะเกิดขึ้นในช่วงของอุณหภูมิที่ต่ำกว่า กระบวนการทอรีแฟคชันจะดำเนินการผลิตของแข็งที่มีปริมาณความชื้นต่ำและค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวลดิบ ส่วนที่สำคัญที่สุดขององค์ประกอบของควันและสารระเหยจะถูกนำออกไปในระหว่างการทอรีแฟคชัน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้มวลที่ต่ำกว่าแต่มีค่าความร้อนที่สูงกว่า โดยทั่วไปจะเกิดการสลายตัวและการคาร์บอนไนเซชันของเฮมิเซลลูโลส การลดการสลายตัวและการเกิดสารระเหยของลิกนินและเซลลูโลส คุณสมบัติของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ได้แก่ ความสามารถในการบด ความสามารถในการขึ้นรูป ค่าความไม่ชอบน้ำ ดังนั้นจะมีการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงาน จะมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของ Ultimate และ proximate จากการเพิ่มของปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนและการลดลงของปริมาณความชื้นและออกซิเจน [6]

Chen W.H. et.al., (2011) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการทอรีแฟคชันบล็อกไม้ (Lauan) และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวล ที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันคือ 220, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการทอรีแฟคชันอย่างเบา อ่อนและรุนแรง ตามช่วงเวลาของการทอรีแฟคชันที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง หลังจากการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันที่ 280 องศาเซลเซียส จะเพิ่มค่าความร้อนของไม้ได้ถึง 40% ในขณะที่น้ำหนักของไม้จะสูญเสียไป 50% การเพิ่มความสามารถในการบดและค่าความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงมวลที่สูญเสียของไม้ จะทำได้ดีในช่วงอุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ไม้ที่ได้ทำปฏิกิริยากว่า 50% จะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่ถูกควบแน่นนั้นคือ monoaromatics ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยๆ ของ heterocyclic hydrocarbons ที่ได้รับจากกระบวนการทอรีไฟร์ [7]

Phanphanich M. et.al., (2011) ได้ทำการศึกษาลักษณะของเชื้อเพลิงและความสามารถในการบดของแผ่นไม้สนและไม้ซุงที่ได้รับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 225 - 300 องศาเซลเซียส ในเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพการบดของชีวมวลทอรีไฟร์จะประเมินจากพลังงานที่ต้องการในการบด การกระจายของขนาดอนุภาคและขนาด

ของอนุภาคเฉลี่ย เพื่อที่จะเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบและถ่านหิน จากการศึกษาพบว่า พลังงานจำเพาะที่ต้องการในการบดของชีวมวลทอริไฟร์นี้จะลดลงไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ พลังงานการบดของชีวมวลทอริไฟร์จะลดลงเป็น 24 kW/h ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของแผ่นไม้สนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ด้วย กระบวนการทอริแฟคชันของชีวมวลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเป็นการปรับปรุงเชื้อเพลิงและปรับปรุงคุณสมบัติในการบดที่ใกล้เคียงกับถ่านหิน [8]

T.G. Bridgeman. et.al., (2008) ได้ทำการศึกษาทดสอบกระบวนการทอริแฟคชัน ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ด้วยชีวมวลทั้งสามชนิด คือ ดอกหญ้า ฟางข้าว และวิลโลว์ การประเมินผลิตภัณฑ์และมวลพลังงานที่สูญเสียในระหว่างกระบวนการได้ทำการศึกษาในขนาดห้องปฏิบัติการ การทดลองที่สภาวะกระบวนการทอริแฟคชันที่แตกต่างกันจะดำเนินการตรวจสอบหาความเหมาะสมของกระบวนการของชีวมวลทั้งสามชนิดนี้ กระบวนการทอริแฟคชันจะดำเนินการวิเคราะห์ทางเคมีและลักษณะของชีวมวลเริ่มต้นจะคล้ายกับถ่านหิน นอกจากนี้จะชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบของสารระเหยจะลดลง และการผลิตพลังงานทางเลือกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เสถียรกว่า แต่ในระหว่างการเผาไหม้ความร้อนของปฏิกิริยาจะดีกว่า ความแตกต่างระหว่างผลได้ของพลังงานและมวลจะปรับปรุงอุณหภูมิทอริแฟคชันที่สูงกว่า พฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลดิบและชีวมวลทอริไฟร์จะได้รับการศึกษาด้วย differential thermal analysis (DTA) จากอนุภาคแขวนลอยเดี่ยวใน methane-air flame และการดำเนินการเผาไหม้จะเก็บผลด้วยกล้องความเร็วสูง แสดงให้เห็นว่าสารระเหยและคาร์ที่ได้จากการทอริไฟร์ชีวมวลจะคายพลังงานเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบและจะขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการทอริแฟคชัน เชื้อเพลิงทอริไฟร์จะมีพลังงานที่สูงถึง 96% ต้นวิลโลว์ทอริไฟร์จะจุดติดไฟได้อย่างรวดเร็ว อาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณความชื้นมีค่าทำให้จุดติดไฟได้อย่างรวดเร็ว อนุภาคทอริไฟร์จะเริ่มต้นด้วยการเผาไหม้คาร์ที่เร็วกว่าการเผาไหม้วิลโลว์ [9]

วิชชุดา เมตตานันท และคณะ (2556) : ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติกึ่งยาสูบด้วยการทอริแฟคชัน ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้กึ่งยาสูบที่ยังไม่ได้ผ่านการทอริแฟคชัน มีความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 14,875.28 kJ/kg และมีองค์ประกอบทางเคมีโดยมวลดังนี้ มีปริมาณ C 33.53 เปอร์เซ็นต์ H 5.61 เปอร์เซ็นต์ N 3.57 เปอร์เซ็นต์ และ O 57.29 เปอร์เซ็นต์ และในแต่ละการทดลองจะใช้กึ่งยาสูบปริมาณ 25 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) การทดลองทำที่ความดันบรรยากาศโดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 220, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที ส่งผลให้มี 9 กรณีนี้อัตราการเพิ่มอุณหภูมินั้นกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที นอกจากนี้ยังมีการใช้ก๊าซไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ระดับ 99.9 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ให้ไหลผ่านเตาปฏิกรณ์ตลอดการทดลองเพื่อให้ภายในเตาปราศจากออกซิเจน หลังการทดลองได้นำชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชันไปวัดค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น LECO AC-350

- ผลของอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อลักษณะภายนอกของกิ่งยาสูบพบว่าเมื่อกิ่งยาสูบผ่านการทอรีแฟคชั่นจะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับกิ่งยาสูบดิบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการกลั่นสลาย (devolatilization) และกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ขององค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ในชีวมวล

- ผลของอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าความร้อนของกิ่งยาสูบพบว่าอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นส่งผลต่อค่าความร้อนของกิ่งยาสูบมากกว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นๆ ที่อุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชั่นเดียวกันคือ 280 องศาเซลเซียส และ 120 นาที พบว่า ค่าความร้อนสูงของกิ่งยาสูบมีค่าใกล้เคียงกับชีวมวลอื่นๆ ได้แก่ ไม้สน ไม้เบิร์ช และชานอ้อย

- ผลของอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อการดูดความชื้นกลับของกิ่งยาสูบพบว่ากิ่งยาสูบที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น มีการดูดความชื้นกลับต่ำกว่ากิ่งยาสูบที่ไม่ผ่านกระบวนการโดยการดูดความชื้นกลับของกิ่งยาสูบลดลงมากที่สุดถึง 54.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการทดสอบการดูดความชื้นกลับของกิ่งยาสูบนั้นทำโดย การชั่งน้ำหนักกิ่งยาสูบหลังจากถูกแช่ในน้ำเป็นเวลาต่างๆ จากนั้นคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นกลับ [5]

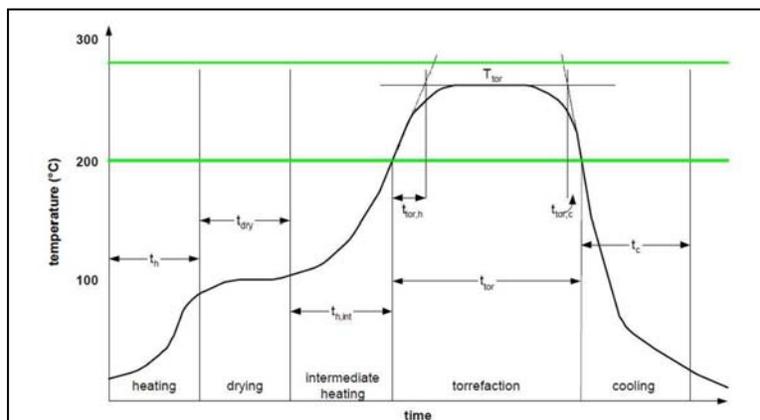
จากตัวอย่างงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากิ่งยาสูบมีคุณสมบัติดีขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น ซึ่งเป็นกระบวนการลดความชื้นในชีวมวล และยังเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มก๊าซผลิตภัณฑ์ที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หากเปรียบเทียบชีวมวลที่ผ่านกระบวนการและไม่ผ่านกระบวนการ ชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่น จะดูดความชื้นกลับลดลงมากที่สุดถึง 54.43 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นชัดว่า หากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น จะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นจากชีวมวลปกติ

2.3.1 หลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น

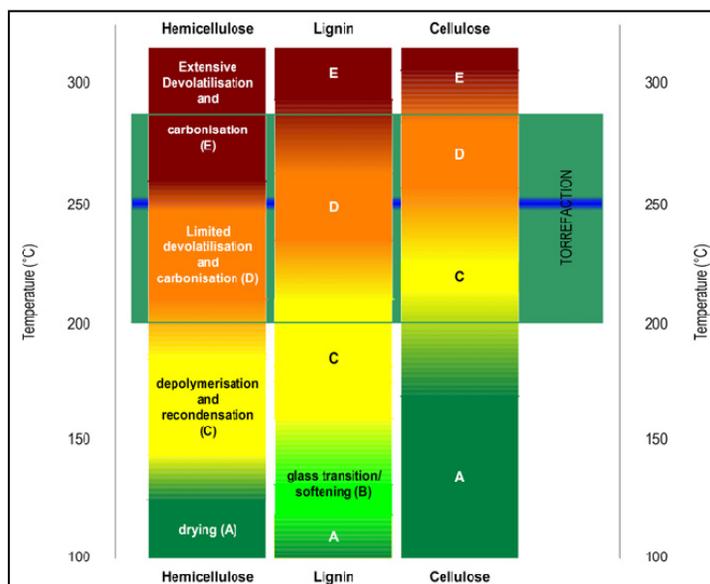
สำหรับขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ 1.ช่วงการทำความร้อน 2.การอบแห้ง 3.การทำความร้อนชั้นกลาง 4.การทอรีแฟคชั่นและการทำเย็น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1

โดยชีวมวลดิบถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในขั้นตอนการทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิชีวมวลดิบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง ในกระบวนการทำความร้อนอัตราการทำความร้อนควรจะต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อชีวมวลดิบเข้าถึงอุณหภูมิที่ต้องการโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 90 - 150 องศาเซลเซียส เป็นการเริ่มต้นการอบแห้งชีวมวลดิบ น้ำอิสระภายในชีวมวลจะระเหยและปริมาณความชื้นของชีวมวลดิบจะลดลง มันเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเอาน้ำออกจากชีวมวลดิบ ซึ่งหากไม่มีการดำเนินการดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายทางความร้อนชีวมวลดิบในขั้นตอนทอรีแฟคชั่น เมื่อขั้นตอนแรกสิ้นสุดลง ชีวมวลถูกให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่เรียกว่าขั้นตอนการทำความร้อนชั้นกลาง ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น อุณหภูมิของชีวมวลถูกรักษาให้คงที่ในช่วง 200 - 300 องศาเซลเซียส ในระหว่างช่วงเวลากการย่อยสลายทางความร้อน เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวในสารชีวมวลดิบในช่วงแรกอุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส ต่อมาลิกนินและบางส่วนของเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ

270 - 300 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อนจะแสดงดังรูปที่ 2.1 ขั้นตอนการทอรีแฟคชันจะสำเร็จเมื่อการทอรีไฟร์ชีวมวลถูกเพิ่มในอุณหภูมิสูงและการทำเย็นนั้นจะต้องไรร้ออกซิเจนหรือทั้งสองกระบวนการอยู่ในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย [10]



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชัน[10]



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อน[10]

2.3.2 ผลของชีวมวลที่ผ่านการกระบวนการทอรรีแฟคชั่น (Torrefaction)

2.3.2.1 ค่าความร้อน

ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงนั้นถูกเผาไหม้ โดยทั่วไปค่าความร้อนมี 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูง (High Heating Value) และค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value) ซึ่งค่าความร้อนสูงเป็นค่าที่วัดได้โดย รวมความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกลั่นตัวของไอน้ำเข้าด้วยวิธีการหาค่าความร้อนด้วยการเผาไหม้โดยตรงสามารถทำได้ด้วยการใช้ บอมบ์คาลอริมิเตอร์ ดังแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงระหว่างสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ด้วยมาตรฐาน ASTM –E 711 [18], NBR 8633/84 standard [19]



รูปที่ 2.3 บอมบ์คาลอริมิเตอร์

การคำนวณค่าความร้อน

การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่แท้จริง ได้ดังสมการ

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- a คือ เวลาของการจุดระเบิด (นาที)
 - b คือ เวลาเมื่ออุณหภูมิถึง 60% ของที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (นาที)
 - c คือ เวลาที่เริ่มต้นของคาบ (หลังจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น)ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลายเป็นคงที่ (นาที)
 - t คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ถูกต้อง (องศาเซลเซียส)
 - t_c คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่อ่านได้ (องศาเซลเซียส)
 - t_a คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ที่เวลาจุดระเบิด (องศาเซลเซียส)
 - r_1 คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมะหว่าง 5 นาทีก่อนจุดระเบิด (องศาเซลเซียสต่อนาที)

r_2 คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง 5 นาทีหลังจากเวลาที่เริ่มต้นของคาบ c (องศาเซลเซียสต่อนาที)

ค่าความร้อนของการเผาไหม้

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (2.2)$$

เมื่อ H_g คือ ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้ (จูลต่อกรัม)
 W คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
 m คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)
 e_1 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ HNO_3 (23.9 แคลอรี)
 e_2 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ H_2SO_4 (13.7 แคลอรี)
 e_3 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิกเกิลโครม)

ค่ามาตรฐานแคลอริมิเตอร์

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_3}{t} \quad (2.3)$$

เมื่อ W คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
 H คือ ค่าความร้อนของกรดเบนโซอิก (ให้พลังงาน 6318 แคลอรีต่อกรัม)
 m คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)
 t คือ ผลรวมของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)
 e_1 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ HNO_3 (23.9 แคลอรี)
 e_3 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิกเกิลโครม)

2.3.2.2 ค่าความชื้น

ปริมาณความชื้น (moisture content) แสดงออกมาเป็นสัดส่วนน้ำหนักของความชื้นต่อน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงแห้งหรือน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงรวมทั้งหมด สามารถคำนวณได้จาก

$$M\% = \frac{W_0 - W_f}{W_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิง (กรัม)

W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของเชื้อเพลิง (กรัม)

M คือ ค่าความชื้น (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณความชื้นของชีวมวลจะขึ้นอยู่กับพันธุ์ไม้ (เช่น ไม้สน ยางพารา กระจิน ต้นสัก) ชนิดส่วนประกอบ (เช่น แคนไม้ เปลือกไม้) และกระบวนการเตรียม (เช่น ชีวมวลที่ได้จากการตัดแต่ง การสกัดเปลือก ชีวมวลจากโรงเลื่อย โรงผลิตเยื่อกระดาษ) ซึ่งมีความหลากหลายมากในช่วง 10-60% จากเนื้อไม้ที่มีความพรุนและธรรมชาติของการรับและสูญเสียความชื้นได้นี้นำไปสู่แนวคิดเกี่ยวกับจุดอิ่มตัวของเส้นใย (fiber saturation point, FSP) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นระดับปริมาณความชื้นที่ช่องรูพรุนหรือพื้นผิวภายในเส้นใยของไม้ถูกปกคลุมด้วยชั้นน้ำซึ่งอยู่บนผิวได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน จุดอิ่มตัวของเส้นใยจึงเป็นจุดที่บ่งบอกถึงการหดตัวหรือการบวมของเนื้อไม้หากมีการดึงน้ำออกหรือเติมน้ำเข้าไปในเนื้อไม้ โดยทั่วไปจุดอิ่มตัวของเส้นใยของไม้จะอยู่ที่ประมาณ 23-27% ของมวลรวมทั้งหมด โดยในการวัดค่าความชื้นนั้นจะทำได้โดยการนำเชื้อเพลิงเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความชื้นของเชื้อเพลิง โดยรูปตู้อบลมร้อนจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตู้อบลมร้อน

2.3.2.3 ความหนาแน่นบักก์

ค่าความหนาแน่นบักก์ คือน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM E-873 [10] ด้วยการบรรจุลงในกล่องกว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.3 เมตร และสูง 0.3 เมตร โดยปล่อยเชื้อเพลิงด้วยความสูง

จากปากของกล่อง 0.61 เมตร จากนั้นเอากล่องกระแทกขึ้นจากความสูง 0.15 เมตร เป็นจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณค่า ความหนาแน่นบักก์ โดยเครื่องวัดค่าความหนาแน่นบักก์จะแสดงดังรูปที่ 2.5

$$\rho_{bulk} = \frac{m_f - m_b}{V_b} \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ_{bulk} คือ ความหนาแน่นบักก์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 m_f คือ มวลของวัตถุที่ต้องการวัด (กิโลกรัม)
 m_b คือ มวลของกล่อง (กิโลกรัม)
 V_b คือ ปริมาตรของกล่อง (ลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบค่าความหนาแน่นบักก์

2.3.2.4 ค่าความทนทาน

การวัดค่าความทนทาน (Durability) โดยนำตัวอย่างจำนวน 0.5 กิโลกรัมใส่ในเครื่องวัดความทนทาน เครื่องจะหมุนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลานำตัวอย่างมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 1/8 นิ้ว เศษผงและส่วนที่แตกออกจะร่วงผ่านตะแกรง ในขณะที่ตัวอย่างที่สมบูรณ์จะอยู่บนตะแกรง นำตัวอย่างที่เหลืออยู่บนตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก โดยเครื่องวัดความทนทานจะแสดงดังในรูปที่ 2.6 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าความทนทานจากสมการ

$$PDI = 100 \times \frac{WPW}{IW} \quad (2.6)$$

เมื่อ PDI คือ ค่าความทนทานแท้เชิงเพลิง
 WPW คือ น้ำหนักแห้งซีเมนต์ที่สมบูรณ์ไม่แตกหัก

IV คือ น้ำหนักแห้งชีวมวลเริ่มต้น



รูปที่ 2.6 เครื่องวัดความทนทาน

2.3.2.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคคือกระบวนการที่ใช้ในการประเมินการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุที่เป็นเม็ด การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตวัสดุ การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ และนำค่าของที่เหลือตกอยู่บนตะแกรงมาวิเคราะห์ โดยรูปของเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค

2.3.2.6 ความไม่ชอบน้ำ

เป็นการศึกษาปริมาณความชื้นที่ชีวมวลดูดเข้าไป ซึ่งจะทำให้ชีวมวลเน่าสลายและผุพังได้ง่าย เมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน ๆ เมื่อนำชีวมวลมาผ่านการทอริไฟร์จะทำให้ชีวมวลมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ เนื่องจากระหว่าง

กระบวนการทอริไฟร์ความร้อนจะทำลาย OH-groups ที่อยู่ในชีวมวล ทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่อึดตัว และไม่มีขี้ ทำให้ลิกนินกลายเป็นสารพลาสติกธรรมชาติที่เคลือบอยู่ในชีวมวลส่งผลให้ชีวมวลทอริไฟร์ มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ [20]

2.3.2.7 การวิเคราะห์ประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้เป็นแบบพื้นฐานเปียก (wet basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) และแบบพื้นฐานแห้ง (dry basis) จากการอบวัสดุเชื้อเพลิงให้ความร้อนในภาชนะปิดภายใต้บรรยากาศของก๊าซควบคุมเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณแสดงในตารางที่ 8.2 ซึ่งมีข้อสังเกตคือ อัตราส่วนระหว่างสารระเหยต่อคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ประมาณ 2.5 - 3.5 เท่าสำหรับไม้ และ 2.5 - 5.2 เท่าสำหรับเศษวัสดุการเกษตร ปริมาณเถ้าในชีวมวลเศษวัสดุการเกษตรมีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวลประเภทไม้ ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆในเชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน [21-23]

2.4 เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเตาเผาแบบหมุน

เตาเผาแบบหมุน มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว เอียงเล็กน้อย มีตัวมอเตอร์เพื่อขับให้ตัวเตาหมุนตลอดเวลา มีลักษณะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงภายในห้องเผาไหม้จึงประกอบไปด้วยวัสดุทนไฟ สามารถควบคุมระยะเวลาการเผาไหม้และปริมาณของวัตถุดิบที่จะเผาได้ จึงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ [5]

2.4.2 ชนิดของเตาเผาแบบหมุน

2.4.2.1 เตาเผาแบบเปียก (Wet Kilns)

เตาเผาแบบเปียกมักจะถูกป้อนด้วยวัสดุละลาย เตาเผาแบบเปียกจะมีความยาวของเตาเผาอยู่ที่ 150-180 เมตร (ประมาณ 500-600 ฟุต) นอกจากนี้ยังใช้ในการทำลายก้อนวัสดุใดๆ ที่อาจอยู่ในรูปวัสดุกำลังเปลี่ยนแปลงสถานะสารละลายไปเป็นของแข็งเมื่ออบแห้ง ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เตาเผาเหล่านี้ไม่มีประสิทธิภาพและจะถูกแทนที่ด้วยเตาเผาแบบแห้งชนิดยาว แต่ในการใช้งานบางอย่างที่ไม่ได้เหมาะสมกับการใช้งานของเตาเผาแบบแห้งชนิดยาว เช่น เตาเผาปูนขาวที่พบในเยื่อกระดาษและอุตสาหกรรมกระดาษและการประยุกต์ใช้อาหารบางอย่าง ซึ่งรูปเตาเผาแบบเปียกจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เตาเผาชนิดเปียก (Wet Kilns)

ที่มา : <http://www.rotarykiln.net/what-is-a-rotary-kiln/>

2.4.2.2 เตาเผาแบบแห้งชนิดยาว (Long Dry Kilns)

เตาเผาเหล่านี้จะสั้นกว่าเตาเผาชนิดเปียก ที่มีความยาวในการสั่งซื้อที่ 90 – 120 เมตร (ประมาณ 300 - 400 ฟุต) สำหรับเตาเผาแบบแห้งชนิดยาว คล้ายกับเตาเผาชนิดเปียก การอบแห้ง การอุ่น และการเผาทั้งหมด เกิดขึ้นในหนึ่งภาชนะอย่างไรก็ตาม เตาเผาชนิดนี้ทำงานได้ดีเมื่อป้อนอนุภาคขนาดใหญ่เหตุผลที่มีความยาวค่อนข้างสั้น เนื่องจากการป้อนวัสดุที่แห้งมีความชื้นต่ำ มีลักษณะเช่นเดียวกับของแข็งขนาดเล็กมากกว่าที่จะเป็นสารละลาย การใช้งานในรูปแบบเตาเผาปูนขาว จะมีการบดวัสดุให้มีขนาดประมาณ 1.3 – 5 เซนติเมตร (0.5 – 1.5 นิ้ว) ก่อนป้อนเข้าเตาเผา ซึ่งเตาเผาแบบแห้งชนิดยาวจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เตาเผาแบบแห้งชนิดยาว (Long Dry Kilns)

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.3 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kiln)

เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้นมักจะมาพร้อม Preheater หรือ Pre-calciner ภายนอกซึ่งมันป้อนวัสดุแบบแห้งอุ่นหรือแม้กระทั่งการเผาบางส่วนก่อนที่จะเข้าเครื่องปฏิกรณ์หลัก (เตาเผา) ส่งผลให้ภาวะความร้อนในเตาเผาหลักที่เหมาะสมจะลดลง ดังนั้นการติดตั้ง Preheaters หรือ Pre-calciners หรือมีแนวโน้มที่จะทำให้ขนาดของเตาเผาสั้นลง ขนาดของเตาเผาอยู่ที่ 15-75 เมตร (ประมาณ 50-250 ฟุต) ขึ้นอยู่กับการสั่งซื้อและกระบวนการที่นำไปใช้ รูปแบบการใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบของเตาเผาหินปูนและปูนขาว เนื่องจากขนาดอนุภาควัสดุขนาดใหญ่ที่พบในการเผาหินปูนเตาเผาปูนในปัจจุบันมีการติดตั้ง Preheaters ทำหน้าที่เป็นทางลัดของหินที่มีการไหลทวนของเตาเผาก๊าซไอเสียมากกว่าในระบบเตาเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งเตาเผาแบบแห้งชนิดสั้นจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kilns)

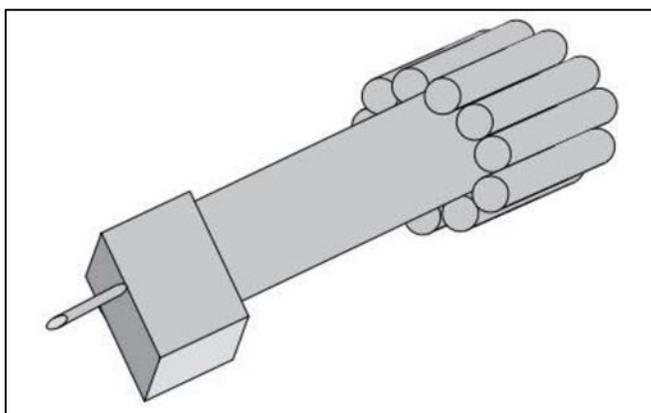
ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.4 เตาเผาแบบคูลเลอร์และเครื่องเป่า (Cooler and Dryer Kilns)

Cooler และ Dryer บางชนิดสามารถอยู่ในรูปแบบตัวสัมผัสที่ติดกับเตาเผาแบบหมุนได้โดย แม้ว่าบางอันจะมีคอนแทคบรรจุเพียงเช่นตะแกรงคูลเลอร์ คูลเลอร์แบบหมุนสามารถเป็นได้ทั้งในสายการผลิตหรือที่แนบมาจำนวนซึ่งจะถูกกำหนดโดยสูตรง่าย ๆ

$$N = \frac{\pi \times (D + d + 2)}{d + 1} \quad (2.7)$$

เมื่อ D และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาและ cooler ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Cooler ทาโหลต เครื่องจักรกลพิเศษที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณการออกแบบ พวกเขายังมีความท้าทายในการบำรุงรักษาในปัจจุบัน เตาเผาแบบหมุนที่มี Cooler และ Dryer จะมีการติดตั้ง tumblers และ ไบกวน (lifters) ซึ่งการจับตัวของวัสดุที่ดี ซึ่งเตาเผาแบบ Cooler and Dryer จะแสดงในรูปที่ 2.11



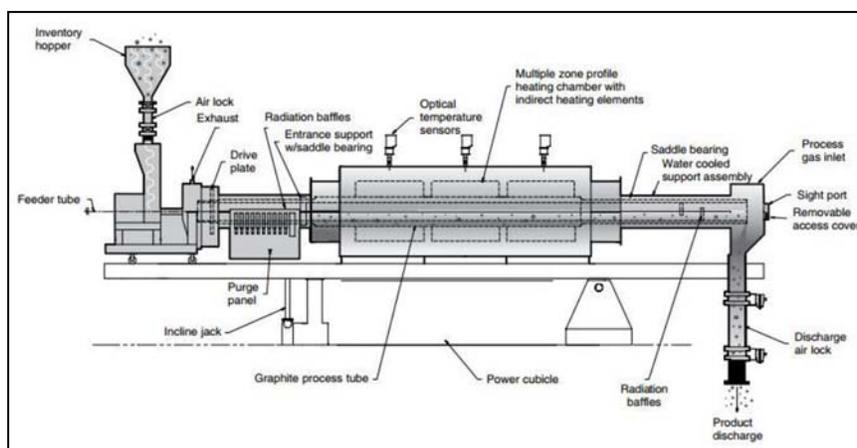
รูปที่ 2.11 เตาเผาแบบ Cooler and Dryer

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.5 เตาเผาแบบให้ความร้อนภายนอก (Indirect fired Kiln)

เตาเผาชนิดนี้นิยมให้ความร้อนจากภายนอก มักจะได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่ติดต่อโดยตรงระหว่างวัสดุและก๊าซให้แหล่งความร้อนที่ไม่พึ่งประสงค์ ในกรณีนี้แหล่งความร้อนภายนอกเพื่อเป็นเตาเผา แก๊สไหลผ่านภายใน ที่อยู่ใน freeboard ที่ใช้สำหรับล้างการระเหยหรือก๊าซที่เกิดขึ้นจากแนวของวัสดุเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือกายภาพ เนื่องจากประสิทธิภาพของความร้อนต่ำ เตาเผาอุณหภูมิกว้างมีขนาดเล็ก โดยทั่วไปค่าจะเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 m (50 นิ้ว) และใช้สำหรับการใช้งานเฉพาะเช่น การเผาวัสดุพิเศษ

คุณลักษณะเฉพาะของเตาเผาชนิดนี้ คือ ความหลากหลายและถูกจัดแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ควบคุมได้เป็นช่วงๆ ซึ่งสามารถให้ความร้อนโดยไฟฟ้า หรือ แก๊สร้อน ดังนั้นเตาเผาชนิดนี้สามารถให้ในอุณหภูมิสูง ในบางกรณีเช่น เตาเผากราฟท์ที่สามารถให้อุณหภูมิถึง 2,400 องศาเซลเซียส เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดช่วงของเวลา และ ควบคุมอากาศ รวมไปถึงการควบคุมสารไวไฟ ลักษณะการใช้งานโดยทั่วไปของเตาเผาชนิดนี้ได้แก่ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (calcination), ปฏิกิริยา Reduction, ปฏิกิริยาการควบคุม oxidation, ปฏิกิริยา carburization, ปฏิกิริยา solid-state reactions และ ปฏิกิริยา purification รวมไปถึงการฟื้นฟูของเสียในขนาดเล็กที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งเตาเผาแบบ Indirect fired จะแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เตาเผาแบบ Indirect fired

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.3 ส่วนประกอบของเตาเผาแบบหมุน

2.4.3.1 ห้องเผาไหม้

องค์ประกอบโดยพื้นฐานของห้องเผาประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ

ส่วนเปลือกนอกเตาเผา เป็นส่วนนอกสุดของเตาเผา ทำมาจากเหล็กกล้าที่ทำขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะงาน แผ่นเหล็กกล้ารีดบางมีความหนา มักจะอยู่ในช่วง 18-25 มิลลิเมตร เป็นแผ่นรีดเย็นลักษณะโดยทั่วไปเป็นชิ้นครึ่งวงกลม เมื่อนำมาประกบกันแล้วจะทำให้เปลือกนอกมีความยาวเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ส่วนสั้นมักจะถูกรวมที่โรงงานและการประกอบขั้นสุดท้ายที่ได้ดำเนินการในสถานที่ที่มีเตาเผาในสถานที่ ปัญหาที่พบบ่อยคือ อุณหภูมิสูงสุดในเตาเผาได้เพียง 1400 องศาเซลเซียส ขณะที่แก๊สมีอุณหภูมิถึง 1900 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้าเพียง 1300 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าจะเริ่มอ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส จึงมีส่วนที่เป็นอิฐทนไฟหรือชั้นซีเมนต์

ชั้นวัสดุทนไฟ ประกอบด้วยอิฐทนไฟหรือคอนกรีตหล่อ มีไว้การป้องกันเปลือกนอกเตาเผาจากอุณหภูมิที่สูงภายในเตาเผาและเพื่อปกป้องมันจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีฤทธิ์กัดกร่อน วัสดุทนไฟที่เลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในเตาเผาและลักษณะทางเคมีของวัสดุที่อยู่ในเตาเผา ความหนาของเยื่อโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 80-300 มิลลิเมตร วัสดุทนไฟโดยทั่วไปจะมีความสามารถในการรักษาอุณหภูมิให้ลดลงจาก 1000 องศาเซลเซียสหรือมากกว่านั้น เพื่อให้อุณหภูมิของเปลือกนอกต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส เพื่อปกป้องเหล็กจากความเสียหาย

ลักษณะดังกล่าวของห้องเผา ยังส่งผลไปยังการออกแบบเตาเผาในส่วนของความยาว, เส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผา และมุมในการหมุนของเตาเผา รูปร่างโดยทั่วไปของเตาเผา มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 3 –6 เมตร และความยาวของเตาเผาอยู่ตั้งแต่ 10 จนถึง 230 เมตร ตามความต้องการของผู้สั่งทำ แต่ส่วนหนึ่งที่ส่งผลต่อการออกแบบเตาเผาเป็นอย่างมากคือ มุมที่ใช้ในการหมุนเตาเผา จากงานวิจัยของ A.S. Bongo Njeng. et.al., (2015)

มุมที่เหมาะสมสำหรับการหมุนเตาเผาอยู่ที่ 2-3 องศา จะทำให้ลักษณะของวัสดุที่ออกมาจากเตาเผามีค่าที่ดีที่สุด มุมของเตาเผานอกจากนี้ส่งผลให้ค่าที่ไม่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่เฉพาะทาง [24-25]

2.4.3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อนเตาเผา

เตาเผามักจะถูกขับเคลื่อนโดยลูกกลิ้งขับเคลื่อน เกียร์จะเชื่อมต่อผ่านทางโซ่เกียร์ปรับความเร็วด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า การเริ่มต้นที่สูงแรงบิดเพื่อเริ่มเตาเผาที่มีการไหลขนาดใหญ่สำหรับ 6 x 60 เมตรต้องใช้เตาเผาประมาณ 800 กิโลวัตต์ที่จะเปิด 3 รอบต่อนาที ความเร็วของการไหลของวัสดุผ่านเตาเผาเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการหมุนและอื่นๆ หากแรงบิดของมอเตอร์ไม่เพียงพอต่อการทำงานของเตาเผา ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของช่วงบนและล่างของเตาเผาได้ ดังนั้นโทรศัพท์ความเร็วจึงเป็นตัวแปรจำเป็นที่จะต้องควบคุม จากงานวิจัยของ A.S. Bongo Njeng. et.al., (2015) ความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนเตาเผาอยู่ที่ 3 รอบต่อนาที วัสดุที่อยู่ภายในเตาเผาจะมีการกระจายตัวที่ดีเมื่อเทียบกับความเร็วอื่นๆ วัสดุจะมีการกระจายตัวที่ติดชั้นอิฐทนไฟ จึงทำให้ได้รับความร้อนจากเตาเผาไม่ทั่วถึง [24-25]

2.4.3.3 แหล่งความร้อน

การแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาเผาแบบหมุนอาจทำได้โดย การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน เรียงตามลำดับประสิทธิภาพของการให้ความร้อน ในกระบวนการที่อุณหภูมิต่ำและในส่วนที่เย็นของเตาเผาแบบยาวยังขาดส่วนของ Preheaters เพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป ภายในเตาเผาจะมีห้องที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน เพื่อกระตุ้นให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซและวัสดุเตาเผาอาจจะประกอบด้วย "scoop" หรือ "lifters" ที่จะจับวัสดุให้โดนกระแสก๊าซอย่างทั่วถึง

2.4.3.4 ไบกวาน

ไบกวาน เป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่ติดตั้งเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุน ทำจากเหล็กกล้า ทนทานต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี รูปร่างและลักษณะของไบกวานนั้นไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความต้องการในการออกแบบและการนำไปใช้งานของผู้สั่งทำ จากงานวิจัยของ A.S. Bongo Njeng. et.al., (2015) รูปร่างของไบกวานในงานวิจัยมี 2 ลักษณะ คือ ไบกวานแบบตรง (Straight lifter) ความหนา 10 มิลลิเมตร ทำมาจาก Incoloy Aolly 800 และ อีกลักษณะคือ ไบกวานแบบตั้งฉาก (Rectangular lifter) ความหนา 10 มิลลิเมตร มุมในการงอ 90 องศา ได้ทำการทดลองในเตาเผาแบบหมุนขนาดความยาว 1.95 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผา 0.101 เมตร ทดลองที่ความเร็วรอบ 3-5 รอบต่อนาที มุมของเตาเผา 1-5 องศา ให้ผลได้ว่า ไบกวานทั้งสองลักษณะส่งผลที่ไม่แตกต่างกันนัยสำคัญ [24,25] และจากงานวิจัยของ H. Lee. et.al., (2013) ได้ทำการออกแบบไบกวานมา 4 ลักษณะ นำมาทดลองเพียงแค่ 3 ลักษณะ ทำการทดลองโดยติดตั้งไบกวานแต่ละแบบลงในเตาเผาแบบหมุนขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เมตร ความยาวเตาเผา 130 เมตร ที่ความเร็วรอบ 1-2 รอบต่อนาที ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การติดตั้ง lifter ช่วยให้อายุเทความร้อนระหว่างวัสดุกับแก๊สร้อนนั้นดีขึ้น และทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาใหม่นั้นกระจายตัวตามแนวแกนได้ดีขึ้นอีกด้วย [26]

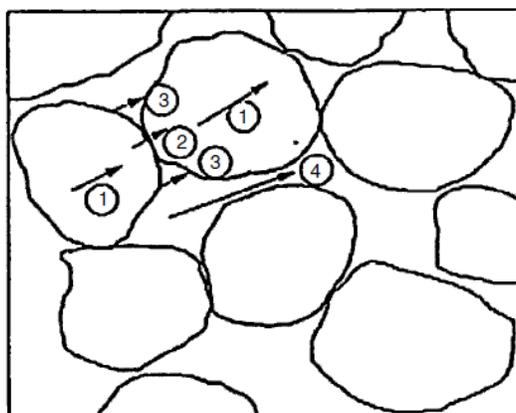
2.4.4 การใช้งานเตาเผาแบบหมุน

เตาเผาแบบหมุนพบในกระบวนการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับของแข็ง รวมไปถึงการอบแห้ง การเผาให้เป็นถ่าน ใช้ในการผสม การให้ความร้อน การทำให้เย็น การทำให้ชื้น การเผา ปฏิกิริยาที่ได้ก๊าซธรรมชาติจากของแข็ง ซึ่งการประยุกต์ใช้เตาเผาแบบหมุนที่พบมากที่สุดและสำคัญที่สุดจะพบในการผลิตปูนซีเมนต์ ผู้ผลิตรายใหญ่ทั้งหมดเลือกใช้เตาเผาแบบหมุนเป็นอุปกรณ์ เตาเผาปูนซีเมนต์อาจมีขนาดใหญ่มาก

การประยุกต์ใช้เตาเผาแบบหมุนอีกแบบคือใช้สำหรับการเผาของเสีย เตาเผาแบบหมุนเป็นที่นิยมสำหรับงานนี้เนื่องจากความยืดหยุ่นของเตา มันสามารถที่จะจัดการกับวัสดุหลากหลายที่ป้อนเข้าไปกับค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงและไม่เป็นปัญหาเรื่องการจัดของเสียที่เป็นของแข็งที่ทางออก [27]

2.4.5 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุน

ระหว่างกระบวนการทางความร้อนของวัสดุขนาดเล็กในเตาเผาแบบหมุนการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในชั้นวัสดุ เกิดขึ้นโดยกลไกที่เหมือนกันในหลายกลุ่มชั้นวัสดุ เส้นทางการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค กับ อนุภาค จะเป็นการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ตลอดจนช่องแคบเล็กๆระหว่าง แก๊สกับอนุภาค จะเป็นการพาความร้อนดังแสดงในรูป 2.13

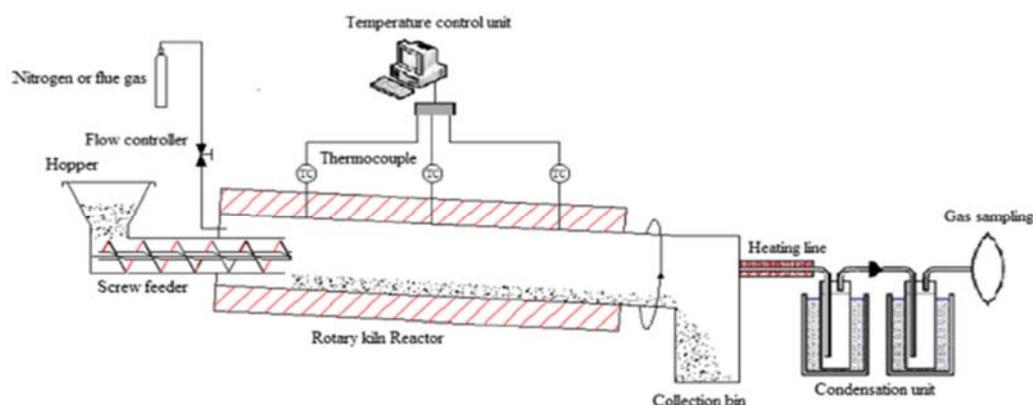


- รูปที่ 2.13 เส้นทางการแลกเปลี่ยนความร้อนของชั้นวัสดุ 1. การนำความร้อนภายใน
2. การนำความร้อนระหว่างอนุภาคกับอนุภาค 3. การแผ่รังสีความร้อนระหว่างอนุภาค กับ อนุภาค
4. การพาความร้อนผ่านช่องแคบเล็กๆ

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.5 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน

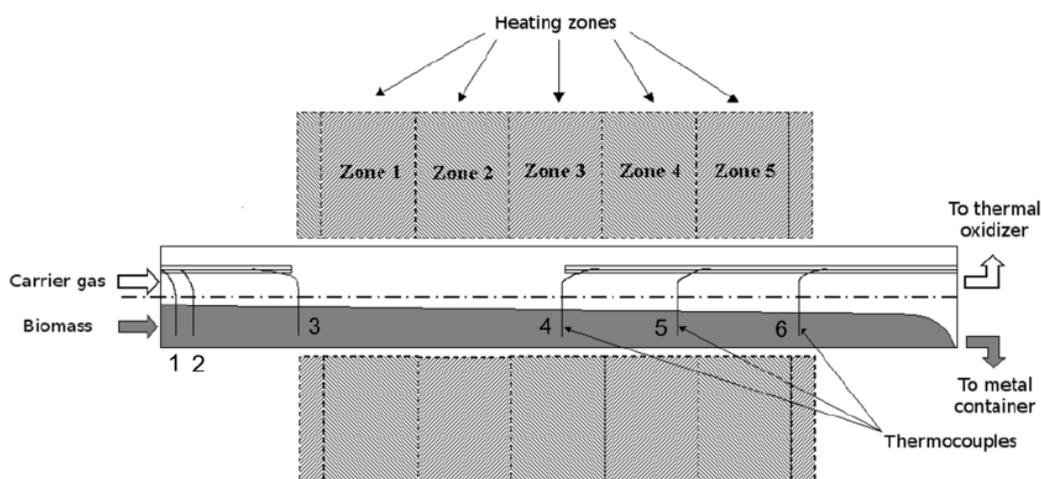
Y. Mei. et.al., (2014) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟคชัน ของไม้ซีดาร์จะดำเนินการในเตาเผาแบบหมุนขนาดกึ่งห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิต่างกัน (200, 230, 260 และ 290 องศาเซลเซียส) การ ทอรีแฟคชัน มีผลต่อคุณสมบัติเกี่ยวกับ ประสิทธิภาพการบด, ความไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะถูกพิสูจน์และลงรายละเอียดรวมถึงการเผาไหม้ด้วย แต่มันกลับกลายเป็นว่าสามารถเทียบได้กับชีวมวลดิบในเรื่องของ ประสิทธิภาพการบด, ความไม่ชอบน้ำ มันมีการปรับปรุง การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันส่งผลให้เกิดการลดลงของการใช้พลังงานในการบด การใช้ก๊าซไอเสียอุตสาหกรรมมีความสำคัญ และมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของไม้ซีดาร์ระหว่างทอรีแฟคชันกับคุณสมบัติของผลผลิต เพื่อเพิ่มความหนาแน่นพลังงานและผลผลิต , อุณหภูมิของการทอรีแฟคชัน ควรควบคุมภายใน 260 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเผาไหม้ของ torrefied ตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นการเผาไหม้ของถ่านที่มีลักษณะคล้ายกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากถ่านลิกไนต์ โดยเตาเผาแบบหมุนที่ใช้ในการทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.14 [28]



รูปที่ 2.14 รูปการณ้่อกแบบของระบบเตาทอรีแฟคชันแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันไม้ซีดาร์ [28]

B. Colin. et.al., (2014) ได้ศึกษาการทอรีแฟคชัน beech chips ในเตาเผาแบบหมุนกึ่งปฏิบัติการ ผลกระทบของตัวแปรในการทำงาน - อุณหภูมิ, ระยะเวลาดำเนินงาน และ ปริมาณของแข็ง บน อุณหภูมิของชั้นวัสดุของแข็งตามเตาเผาและผลได้เชิงมวลของกระบวนการถูกประเมินค่า มันถูกตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิหรือระยะเวลาดำเนินการที่นำไปสู่การลดลงของผลได้เชิงมวลของกระบวนการ นอกจากนี้มันมีหลักฐานแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณของแข็ง ที่การลดลงของผลได้เชิงมวลเหมือนกัน การศึกษาอุณหภูมิตามเตาเผา มีการเปิดใช้งานเพื่อค้นหา โชนอบแห้ง โชนทอรีแฟคชัน การทอรีแฟคชันเริ่มต้นในจุดสุดท้ายที่สามของโชนให้ความร้อน นอกจากนี้ยังถูกตั้งข้อสังเกตว่า ปริมาณของแข็ง เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดความร้อนซ้ำของชีวมวล ใน

ด้านอื่นๆ สำหรับอุณหภูมิที่สูงหรือ ปริมาณของแข็งที่มาก อุณหภูมิของชีวมวลจะเกินกว่าอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งหลักฐานที่เกิดขึ้นเกิดจากของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดความร้อนขึ้น [29]



รูปที่ 2.15 รูปแสดงแผนผังเตาทอรีแฟคชั่นแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น beech chips [29]

2.6 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็ก

การวิเคราะห์พลังงานของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กที่ทำการศึกษานี้พิจารณาให้เตาเผาแบบหมุนเป็นระบบปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังรูปที่ 8-13 ปริมาตรควบคุมนี้จะครอบคลุมในส่วนของเตาเผาแบบหมุน โดยพลังงานที่เข้าสู่ระบบปริมาตรควบคุมนี้ได้แก่พลังงานที่ได้รับจากเชื้อเพลิง

นอกจากนี้ยังมีพลังงานส่วนหนึ่งได้รับจากอากาศที่ใช้ในการสันดาป ทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่ใช้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบได้แก่ พลังงานที่สูญเสียออกไปกับวัตถุดิบ พลังงานที่สูญเสียจากการพาความร้อนออกทางปล่อง พลังงานที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่สูญเสียจากเชื้อเพลิง เป็นต้น

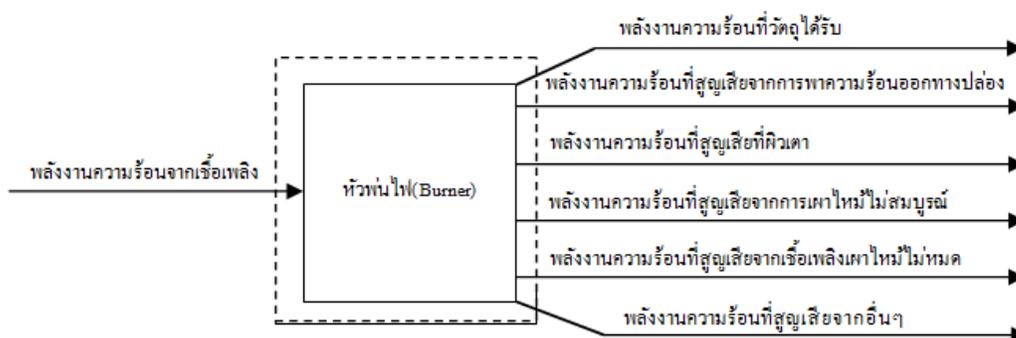
การวิเคราะห์พลังงานที่เข้าและออกจากระบบ ปริมาตรควบคุมนี้จะพิจารณาเทียบกับสภาวะอากาศแวดล้อม และพิจารณาสมดุลพลังงานเมื่อเตาเผาแบบหมุนอยู่ในสภาวะคงตัวโดยมีข้อกำหนดในการสมดุลพลังงานดังนี้

1. ระบบปริมาตรควบคุมที่พิจารณาอยู่ในสภาวะคงตัว
2. ไม่คิดค่าเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ระหว่างทางเข้าและทางออกระบบ
3. องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงรวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงเช่น ค่าความร้อน ความหนาแน่น มีค่าคงที่

4. การพิจารณาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (HHV) ในการคำนวณ
5. เชื้อเพลิงที่ใช้ในเผาไหม้คือ ชีวมวลอัดก้อนจากชี้เลี้ยง
6. กำหนดเริ่มทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เริ่มเทชีวมวลลงไปจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ
7. กำหนดค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิงวัตถุดิบที่ใช้ และก๊าซมีค่าคงที่ตลอดการพิจารณา

จากข้อกำหนดดังกล่าว สามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานของระบบที่ทำการศึกษาดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานเข้าระบบ} &= \text{พลังงานที่ออกจากระบบ} + \text{พลังงานที่สูญเสีย} \\ \text{Energy in} &= \text{Energy out} + \text{Energy loss} \end{aligned} \quad (2.8)$$



ภาพที่ 2.16 แสดงกระแสของพลังงานของเตาเผาแบบหมุน

2.6.1 หลักการวิเคราะห์โดยทั่วไปในการหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์

ในการหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ความร้อน มักใช้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากพลังงานความร้อนที่เป็นประโยชน์ที่ได้จากระบบต่อพลังงานความร้อนที่ให้กับระบบ[24-25] โดยแบ่งเป็น

1. พลังงานที่เข้าสู่ระบบปริมาตรควบคุม
 - พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง
2. พลังงานที่ออกจากระบบปริมาตรควบคุม
 - พลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนออกทางปล่อง
 - พลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
 - พลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง
 - พลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง
 - พลังงานความร้อนที่สูญเสียที่ผิวของเตา

- ค่าความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุนจากสมการ

$$Q_{in} = M \times HHV \quad (2.9)$$

โดย Q_{in} คือ ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุน (kJ/hr)

M คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg/hr)

HHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)

- ค่าความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนออกทางปล่องหัวพันไฟจากสมการ

$$Q_{st} = m_{dfg} \times C_{pg} \times (T_g - T_a) \quad (2.10)$$

โดย Q_{st} คือ ความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนออกทางปล่อง (kJ/kg)

m_{dfg} คือ อัตราการไหลโดยมวลของก๊าซไอเสียที่ออกทางปล่อง (kg/s) เมื่อ $m_{dfg} = \rho VA$

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกทางปล่อง ((kg/m³)

V คือ ความเร็วของก๊าซไอเสียที่ออกทางปล่อง (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของปากปล่อง (m²)

C_{pg} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของก๊าซไอเสีย (kJ/kg·K)

T_g คือ อุณหภูมิของไอเสียที่ออกทางปล่อง (K)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศที่เข้าสู่เตา (K)

- คำนวณค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ได้จากสมการ

$$Q_{icp} = (CO/(CO+CO_2)) \times (23637m_c) \quad (2.11)$$

โดย Q_{icp} คือ ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)

CO, CO_2 คือ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแก๊สไอเสีย (%)

m_c คือ มวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิงหาได้จาก (kg/hr)

$$m_c = (m_f m_{cf} - m_r m_{cr}) / (m_f \times 100) \quad (2.12)$$

m_f คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสันดาป (kg/hr)

m_{cf} คือ มวลของเชื้อเพลิงโดยการวิเคราะห์ (%)

m_f คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ตกเป็นขี้เถ้าจาก m_f (kg/hr)

m_{cr} คือ มวลของคาร์บอนที่อยู่ในขี้เถ้า (%)

- ค่าความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงได้จากสมการ

$$Q_H = 9 \times H_2 \times (584 + C_p(T_f - T_{amb})) \quad (2.13)$$

โดย Q_H คือ ค่าความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (kJ/hr)

H_2 คือ กิโลกรัมไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (kg/hr)

T_f คือ อุณหภูมิไอเสีย ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

- ค่าความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{mc} = M \times (584 + C_p(T_f - T_{amb})) \quad (2.14)$$

โดย Q_{mc} คือ ค่าความร้อนสูญเสียจากความชื้นในตัวเพลิง (kJ/hr)

M คือ กิโลกรัมความชื้นในเชื้อเพลิง (kg/hr)

T_f คือ อุณหภูมิไอเสีย ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

- ค่าความร้อนสูญเสียจากผนังสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{sf} = \sum hA_s(T_s - T_{amb}) \quad (2.15)$$

โดย Q_{sf} คือ ค่าความร้อนสูญเสียจากผนังเตาเผา (kJ/hr)

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)

A_s คือ พื้นที่ผิวของเตาเผา (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิผิวด้านนอก ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

คำสำคัญ

1. เต่าเผาแบบหมุน
2. กระบวนการทอรีแฟคชั่น
3. ชีวมวล
4. ค่าความร้อนสูญเสีย

ตัวแปรต้น

1. ใช้ชีวมวลทั้งหมด 3 ชนิดในการทดลอง คือ แกลบ ชังข้าวโพด และ กะลาปาล์ม
2. ใช้ความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาแบบหมุนทั้งหมด 3 ค่า คือ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที
3. ใช้อุณหภูมิในการบวนการทอรีแฟคชั่น 3 ค่า คือ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส

ตัวแปรตาม

1. ค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นของเต่าเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น
2. ค่าพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ของเต่าเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น
3. คุณสมบัติของชีวมวล ก่อน และ หลัง ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น
4. ต้นทุนของกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ตัวแปรควบคุม

1. ใช้เต่าเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นในการทดลอง ความยาว 6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร
2. มุมเอียงของเต่าเผาแบบหมุนมีค่าเท่ากับ 2 องศา
3. เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนของเต่าเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นคือเชื้อเพลิงอัดก้อนจากขี้เลื่อยผสมกระดาษที่อัตราส่วน 100:10 เปอเซ็นต์โดยน้ำหนัก
4. ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียถูกนำไปเป็นความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อน

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การเตรียมเชื้อเพลิง

1. ทำการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดก้อนจากขี้เลื่อยผสมกระดาษเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยใช้อัตราส่วนของขี้เลื่อยผสมกระดาษเท่ากับ 100:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. นำเชื้อเพลิงอัดก้อนที่ได้จากการขึ้นรูปไปเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นของเชื้อเพลิงเหลือน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์
3. นำเชื้อเพลิงที่ได้จากการอบมาเก็บบรรจุไว้ในภาชนะปิดสนิท เพื่อเตรียมสำหรับเป็นเชื้อเพลิงให้เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

3.2 การติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆของเตาเผาแบบหมุน

1. ทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆของเตาเผาแบบหมุน ได้แก่อุณหภูมิบริเวณห้องเผาไหม้ บริเวณผิวของเตาเผาแบบหมุน อุณหภูมิปล่องไอเสีย และอุณหภูมิบรรยากาศ

3.3 ขั้นตอนการเผาเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล

1. นำชีวมวลที่ผ่านการสับละเอียดที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ใส่ไว้ในฮอปเปอร์เพื่อเตรียมสำหรับป้อนเข้าสู่เตาเผา
2. เปิดระบบควบคุมเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น
3. นำเชื้อเพลิงอัดก้อนที่ได้เตรียมไว้ใส่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากนั้นทำการจุดเชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนให้แก่กระบวนการทอรีแฟคชั่น
4. เมื่ออุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (230, 250 และ 270) องศาเซลเซียส เริ่มทำการป้อนชีวมวลสับละเอียดเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน
5. ชีวมวลจะไหลไปตามท่อของเตาเผาแบบหมุน เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่น ชีวมวลจะไหลเข้าสู่ถังเก็บชีวมวล
6. เมื่อชีวมวลทั้งหมดไหลออกจากเตาเผาแบบหมุน จะถือว่าเสร็จสิ้นการทดลอง

3.4 ขั้นตอนการเก็บอุณหภูมิของเตาเผาแบบหมุนที่จุดต่างๆ

1. อุณหภูมิที่จุดต่างๆของเตาเผาแบบหมุน จะถูกเก็บค่าโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้ก่อนหน้าที่จุดต่างๆต่อเข้ากับเครื่อง data logger รุ่น medi logger GL 820 โดยจะทำการบันทึกอุณหภูมิของเตาเผาแบบหมุนทุกๆ 5 วินาที ตั้งแต่เริ่มกระบวนการ จนถึงสิ้นสุดกระบวนการ

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาแบบหมุน

1. นำข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่างๆของเตาเผาแบบหมุนมาวิเคราะห์โดยอุณหภูมิที่นำมาใช้จะเป็นช่วง steady state (สภาวะคงตัว) หลังจากถึงอุณหภูมิทอริแฟคชั่น
2. คำนวณค่าความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอริแฟคชั่น
3. ทำการคำนวณค่าความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุนจากสมการ

$$Q_{in} = M \times HHV \quad (3.1)$$

โดย Q_{in} คือ ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุน (kJ/hr)

M คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg/hr)

HHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)

4. คำนวณค่าความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนออกทางปล่องหัวพ่นไฟจากสมการ

$$Q_{st} = m_{dfg} \times C_{pg} \times (T_g - T_a) \quad (3.2)$$

โดย Q_{st} คือ ความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนออกทางปล่อง (kJ/kg)

m_{dfg} คือ อัตราการไหลโดยมวลของก๊าซไอเสียที่ออกทางปล่อง (kg/s) เมื่อ $m_{dfg} = \rho VA$

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกทางปล่อง ((kg/m³)

V คือ ความเร็วของก๊าซไอเสียที่ออกทางปล่อง (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของปากปล่อง (m²)

C_{pg} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของก๊าซไอเสีย (kJ/kg·K)

T_g คือ อุณหภูมิของไอเสียที่ออกทางปล่อง (K)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศที่เข้าสู่เตา (K)

5. คำนวณค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ได้จากสมการ

$$Q_{icp} = (CO/(CO+CO_2)) \times (23637m_c) \quad (3.3)$$

โดย Q_{icp} คือ ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)

CO, CO_2 คือ เปอร์เซนต์โดยปริมาตรของแก๊สไอเสีย (%)

m_c คือ มวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิงหาได้จาก (kg/hr)

ค่าคงที่ 23637 คือ พลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

$$mc = (m_f m_{cf} - m_r m_{cr}) / (m_f \times 100) \quad (3.4)$$

m_f คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสันดาป (kg/hr)

m_{cf} คือ มวลของเชื้อเพลิงโดยการวิเคราะห์ (%)

m_r คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ตกเป็นขี้เถ้าจาก m_f (kg/hr)

m_{cr} คือ มวลของคาร์บอนที่อยู่ในขี้เถ้า (%)

6. คำนวณค่าความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงได้จากสมการ

$$Q_H = 9 \times H_2 \times (584 + C_p(T_f - T_{amb})) \quad (3.5)$$

โดย Q_H คือ ค่าความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (kJ/hr)

H_2 คือ กิโลกรัมไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (kg/hr)

T_f คือ อุณหภูมิไอเสีย ($^{\circ}C$)

T_{amb} คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ($^{\circ}C$)

7. ค่าความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{mc} = M \times (584 + C_p(T_f - T_{amb})) \quad (3.6)$$

โดย Q_{mc} คือ ค่าความร้อนสูญเสียจากความชื้นในตัวเพลิง (kJ/hr)

M คือ กิโลกรัมความชื้นในเชื้อเพลิง (kg/hr)

T_f คือ อุณหภูมิไอเสีย ($^{\circ}C$)

T_{amb} คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ($^{\circ}C$)

8. ค่าความร้อนสูญเสียจากผนังสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{sf} = \sum hA_s(T_s - T_{amb}) \quad (3.7)$$

โดย Q_{sf} คือ ค่าความร้อนสูญเสียจากผนังเตาเผา (kJ/hr)

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$)

A_s คือ พื้นที่ผิวของเตาเผา (m^2)

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

T_{amb} คือ อุณหภูมิบรรยากาศ ($^{\circ}C$)

3.6 การวิเคราะห์ต้นทุน

หลังจากที่ได้ดำเนินการทดลองเพื่อหาต้นทุนการผลิตตามเงื่อนไขการทอรีแพคชั้นชีวมวลแล้ว จึงทำการคำนวณเพื่อหาต้นทุนโดยข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลและการคำนวณซึ่งอธิบายได้ ดังนี้

1. ความเร็วรอบ

คือ ความเร็วรอบที่ใช้สำหรับการทดลองในกระบวนการทอรีแพคชั้นโดยใช้เตาเผาแบบหมุน โดยแบ่งเป็น 3 ความเร็วรอบ คือ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที

2. อุณหภูมิ

คือ อุณหภูมิที่ใช้ควบคุมในกระบวนการทอรีแพคชั้น มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ค่า คือ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองอุณหภูมิจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงที่ต้องการโดย บวกลบไม่เกิน 5 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิที่ควบคุม

3. กำลังการผลิต

คือ กำลังการผลิตของเตาเผาแบบหมุน โดยชีวมวลแต่ละชนิดจะมีกำลังการผลิตไม่เท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุภาคชีวมวลและนอกจากนั้นความเร็วรอบก็ส่งผลให้กำลังการผลิตแตกต่างกันอีกด้วย ถึงแม้ว่าจะเป็นชีวมวลชนิดเดียวกันแต่ความเร็วรอบแตกต่างกันกำลังการผลิตย่อมไม่เท่ากันเนื่องมาจากยิ่งความเร็วรอบสูงยิ่งส่งผลให้ชีวมวลเคลื่อนที่ได้เร็ว ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเร็วรอบต่ำก็ส่งผลให้ชีวมวลเคลื่อนที่ได้ช้าลงเช่นกัน

4. ค่าวัตถุดิบ

คือ ต้นทุนของวัตถุดิบทางตรง และต้นทุนค่าขนส่งเข้า โดยค่าวัตถุดิบทางตรง คือ แกลบ ชังข้าวโพด และ กะลาปาล์ม สำหรับงานวิจัยนี้ ไม่มีการซื้อขายกัน หรือไม่มีค่าวัตถุดิบจะคำนวณเฉพาะส่วนของค่าขนส่งแทน และค่าขนส่งเข้าคำนวณจากระยะทางจากแหล่งจำหน่ายชีวมวลมายังแหล่งผลิต โดยมีแหล่งชีวมวลคือภายในจังหวัด นครปฐม และจังหวัดราชบุรี เฉลี่ยระยะทาง 65 กิโลเมตร และใช้ราค้ำมัน ณ วันที่ 24 เดือนมิถุนายน พ.ศ.2560 ใช้รถพ่วงชนิด 5 เพลา 18 ล้อ

5. ค่าแรงงาน

คือ ค่าแรงงานของคนที่ทำเนิการผลิตชีวมวลทอรีไฟร์ โดยคิดค่าแรงงานอยู่ที่ 300 บาทต่อวันต่อคน โดยทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ตามประกาศของกระทรวงแรงงาน

6. ค่าไฟฟ้า

คือ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นทั้งหมด โดยใช้ค่าบริการไฟฟ้าตามที่การไฟฟ้านครหลวง ระบุไว้เดือนมกราคม พ.ศ.2561 ขนาดกิจการขนาดเล็กอัตราค่าบริการจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ Off Peak อัตราค่าบริการ 1.2246 บาทต่อหน่วย และ On Peak อัตราค่าบริการ 4.309 บาทต่อหน่วย

7. ค่าชีวมวลอัดก้อน

คือ ค่าชีวมวลอัดก้อนเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละ อุณหภูมิจะมีปริมาณการใช้ชีวมวลอัดก้อนแตกต่างกัน โดยการใช้ชีวมวลอัดก้อนเป็นเชื้อเพลิงนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้น และ ช่วงคงตัว ดังนั้นอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีการใช้ชีวมวลอัดก้อนในช่วงเริ่มต้น 18 ก้อน และช่วงคงตัวมีอัตราการการใช้ 6 ก้อน/ชั่วโมง อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีการใช้ชีวมวลอัดก้อนในช่วงเริ่มต้น 20 ก้อน และช่วงคงตัวมีอัตราการการใช้ 12 ก้อน/ชั่วโมง และอุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสมีการใช้ชีวมวลอัดก้อน ในช่วงเริ่มต้น 22 ก้อน และช่วงคงตัวมีอัตราการการใช้ 18 ก้อน/ชั่วโมง ตามลำดับและราคาชีวมวลอัดก้อน คือ 0.4 บาท/ก้อน

ค่าชีวมวลก้อน (บาท) = ปริมาณชีวมวลก้อนที่ใช้ไป (ก้อน) × ราคาชีวมวลก้อน (บาท/ก้อน)

ดังนั้น ต้นทุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น = ค่าวัตถุดิบ + ค่าแรงงาน + ค่าชีวมวลอัดก้อน + ค่าไฟฟ้า

3.7 การวิเคราะห์ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

ผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดย ผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นจะมีมวลที่ลดลงโดยค่าผลได้เชิงมวลสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Yield}_m = (M_p / M_i) \times 100 \quad (3.8)$$

โดย Yield_m = ผลได้เชิงมวล (%)

M_i = มวลเริ่มต้น (kg)

M_p = มวลผลิตภัณฑ์ (kg)

ผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์จะแสดงถึงความคุ้มค่าทางพลังงานของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

$$\text{Yield}_e = (\text{HHV}_p / \text{HHV}_i) \times \text{Yield}_m \quad (3.9)$$

โดย $\text{Yield}_e = \text{ผลได้เชิงพลังงาน (\%)}$

$\text{HHV}_p = \text{ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ (kJ/hg)}$

$\text{HHV}_i = \text{ค่าความร้อนเริ่มต้น (kJ/kg)}$

โดยผลได้เชิงมวล (mass yield) จะมีค่าน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์เสมอเนื่องจากในกระบวนการทอรีแฟคชันจะเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบต่างๆของชีวมวลทำให้มวลสุดท้ายของผลิตภัณฑ์นั้นลดลง ยิ่งมวลสุดท้ายเหลือน้อยส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลน้อยลงไปด้วย และพบว่าค่าผลได้เชิงพลังงาน (energy yield) นั้นสามารถมากกว่า 100% ได้ เนื่องจากผลได้เชิงพลังงานนั้นเป็นผลระหว่างผลได้เชิงมวลและค่าความร้อน (HHV) ถ้าชีวมวลหลังกระบวนการทอรีแฟคชันมีค่าความร้อนที่สูงและผลได้เชิงมวลที่สลายตัวลงไม่มาก ผลได้เชิงพลังงานนั้นก็จะมีค่าที่มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นค่าผลได้เชิงพลังงานยิ่งมากขึ้นหมายความว่ามีความคุ้มค่าจากกระบวนการทอรีแฟคชันที่มากขึ้นตามไปด้วย แต่โดยทั่วไปผลได้เชิงพลังงานมักจะมีค่าต่ำกว่า 100% เพราะชีวมวลส่วนมากจะมีการสลายตัวของสารประกอบทางเคมี (เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน) สูงเมื่อได้รับความร้อนและถึงแม้จะมีความร้อนหลังกระบวนการที่เพิ่มขึ้นก็ตามก็ยังทำให้ผลได้เชิงพลังงานมักจะไม่เกิน 100%

4. ผลการดำเนินงานและอภิปรายผล

4.1 ค่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาค่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยมีเชื้อเพลิงอัดก้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนของเตาเผาแบบหมุน โดยค่าความร้อนสูญเสียที่ศึกษาได้แก่ ความร้อนสูญเสียจากผนังของเตาเผาแบบหมุน ค่าความร้อนสูญเสียของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ค่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย ค่าความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง และค่าความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

4.1.1 ค่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาแบบหมุนจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นแกลบ ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อ นาที ที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองของกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นแสดงดังตารางที่ 1 โดยพบว่าค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดมากขึ้นที่สุดคือค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผนังของเตาเผา (Q_{sf}) เนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างความร้อนภายในเตาเผาแบบหมุน ออกมาสู่ผนังของเตาเผาแบบหมุน โดยจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความร้อนสูญเสียที่ผนังเตามีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เพิ่มมากขึ้นนั้นทำให้อุณหภูมิที่ผิวของเตาเผาแบบหมุนนั้นเพิ่มขึ้นตามทำให้การพาความร้อนที่เกิดขึ้นรอบเตาเผาแบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผนังของเตาเผาแบบหมุนนั้น เกิดจากการพาความร้อน ดังนั้นเมื่อการพาความร้อนของเตาเผาแบบหมุนมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความร้อนสูญเสียจากผนังของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่าความร้อนสูญเสียที่มีค่ารองลงมาก็คือ ค่าความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{icp}) ซึ่งการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์นั้นส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มาแทนที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นในระบบมากจึงทำให้เกิดความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบการเผาไหม้คือ ความชื้น และจากตารางพบว่า ค่าความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจากการสูญเสียไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (Q_H) เกิดมาจากไฮโดรเจนที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งในเชื้อเพลิง โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศแล้วเกิดเป็นไอน้ำ ซึ่งเป็นการสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะ โดยจะเห็นว่าค่าความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนสูญเสียจากความชื้น (Q_{mc}) เป็นค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการที่เชื้อเพลิงมีความชื้นอยู่ในระหว่างการเผาไหม้ ความร้อนส่วนหนึ่งที่ได้จากการเผาไหม้นั้นจะถูกนำมาเป็นแหล่งความร้อนให้กับน้ำที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง เพื่อให้น้ำภายในเชื้อเพลิงนั้นระเหยและออกไปพร้อมกับแก๊สไอเสีย ซึ่งจะพบว่า ถ้าความชื้นของเชื้อเพลิงมีค่ามาก ความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรี

แฟคชั่นเพิ่มมากขึ้น ความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้มีค่ามากขึ้น ค่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (Q_{st}) เป็นความร้อนที่เกิดจากไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและออกทางปล่องไอเสีย ซึ่งจะพบว่าความสูญเสียจากปล่องไอเสียนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิไอเสียเป็นหลัก โดยในการทดลองนี้ ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียนั้นจะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับอบเชื้อเพลิงก้อนให้แห้ง โดยจะทำการต่อไอเสียที่ได้จากเตาเผาแบบหมุนเข้าสู่ตู้อบแห้งชีวมวลอัดก้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะได้ว่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียนั้นจะเป็นความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น แกลบที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	18,572.75	21,308.50	23,392.70
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	469.00	957.87	1,454.88
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	24.47	47.03	68.80
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3,035.87	6,071.75	9,107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	57.51	62.74	65.90

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	75.83	43.50	31.84
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.91	1.96	1.98
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.10	0.10	0.09
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.23	0.13	0.09

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นแกลปที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	19294.41	19683.78	22922.78
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	471.80	949.70	1449.52
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	24.20	47.82	69.32
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	58.99	60.59	64.96

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	78.77	40.18	31.20
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.93	1.94	1.97
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.10	0.10	0.09
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.24	0.12	0.09

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นกลับที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	17678.37	16587.48	16103.07
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	448.22	902.63	1373.72
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	26.48	52.36	76.63
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	46.60	48.23	51.69

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	72.18	33.86	21.91
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.83	1.84	1.87
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.11	0.11	0.10
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.19	0.10	0.07

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นซังข้าวโพดที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24493.44	48986.88	73480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	14297.42	16528.66	21009.50
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	445.18	900.27	1374.19
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	26.77	52.59	76.59
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	45.01	47.61	51.77

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	58.37	33.74	28.59
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.82	1.84	1.87
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.11	0.11	0.10
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.18	0.10	0.07

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นซังข้าวโพดที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	16942.35	18108.59	19440.46
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	444.30	902.06	1359.56
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	26.86	52.42	78.00
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	44.54	48.08	49.21

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	69.17	36.97	26.46
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.81	1.84	1.85
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.11	0.11	0.11
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.18	0.10	0.07

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นซังข้าวโพดที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	15259.63	18189.98	19199.52
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	439.64	884.36	1374.83
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	27.31	54.12	76.53
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	42.10	43.43	51.88

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	62.30	37.13	26.13
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.79	1.81	1.87
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.11	0.11	0.10
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.17	0.09	0.07

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นกะลาปาล์มที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	19734.97	21528.69	22741.02
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	470.18	934.59	1428.82
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	24.36	49.28	71.31
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	58.13	56.62	61.34

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	80.57	43.95	30.95
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.92	1.91	1.94
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.10	0.10	0.10
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.24	0.12	0.08

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นกะลาปาล์มที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

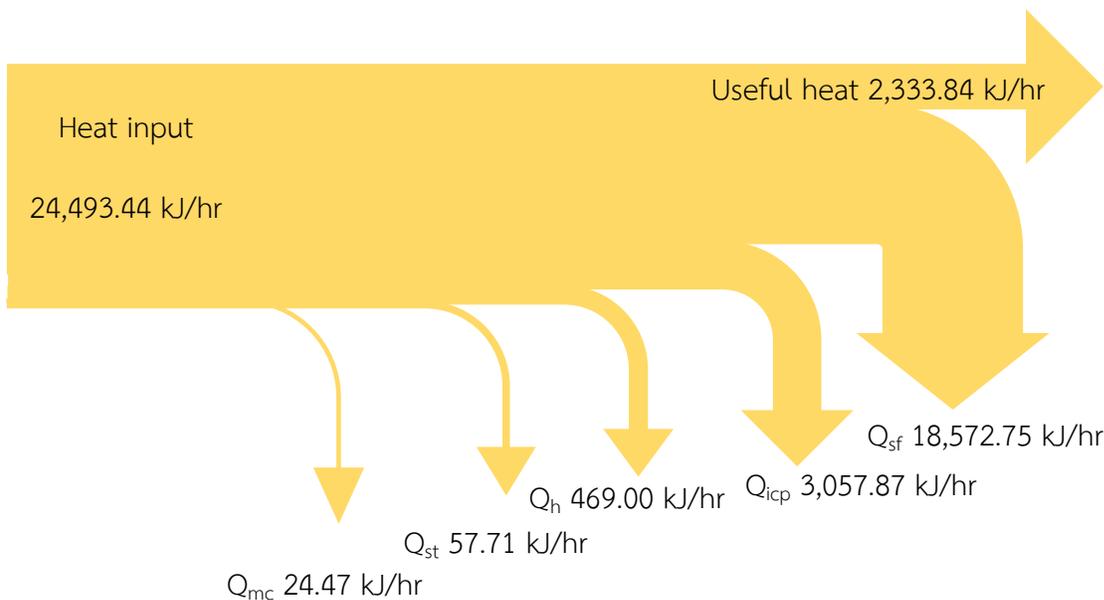
พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	19734.97	21730.22	24991.01
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	470.18	942.66	1419.40
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	24.36	48.50	72.22
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	58.13	58.74	59.69

พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	80.57	44.36	34.01
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.92	1.92	1.93
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.10	0.10	0.10
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.24	0.12	0.08

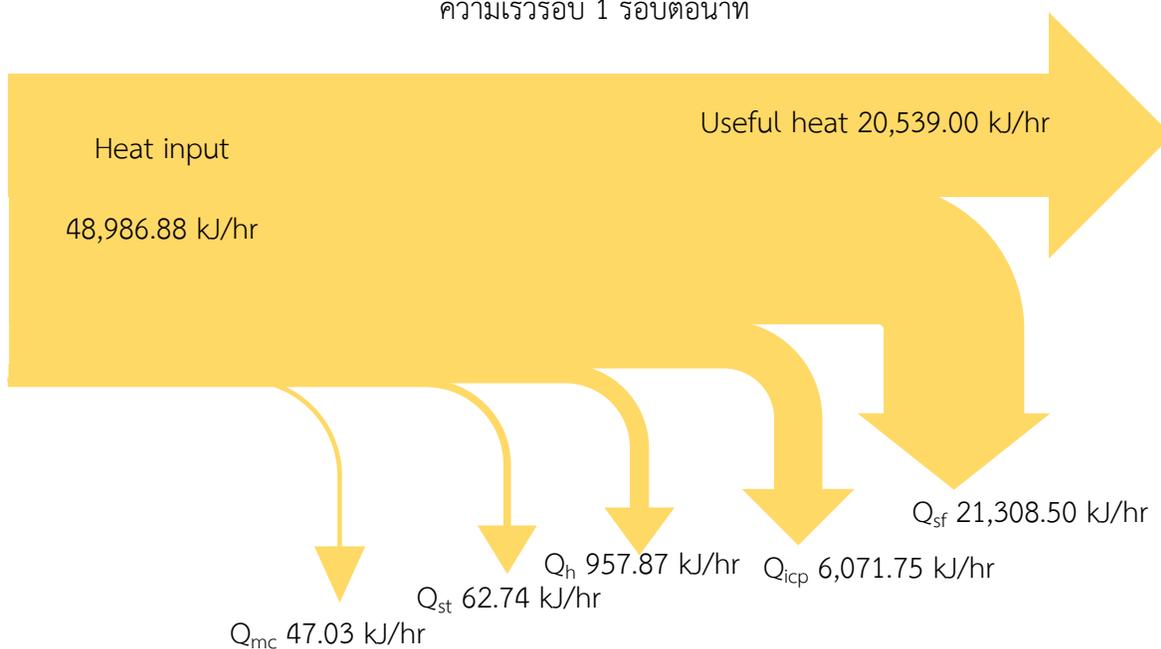
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าความร้อนสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้นกะลาปาล์มที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

พลังงานความร้อน (kJ/hr)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (kJ/hr)	24,493.44	48,986.88	73,480.32
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (kJ/hr)	19389.90	18189.98	26991.57
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (kJ/hr)	464.17	884.36	1430.46
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (kJ/hr)	24.94	54.12	71.16
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/hr)	3035.87	6071.75	9107.62
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/hr)	54.98	43.43	61.62

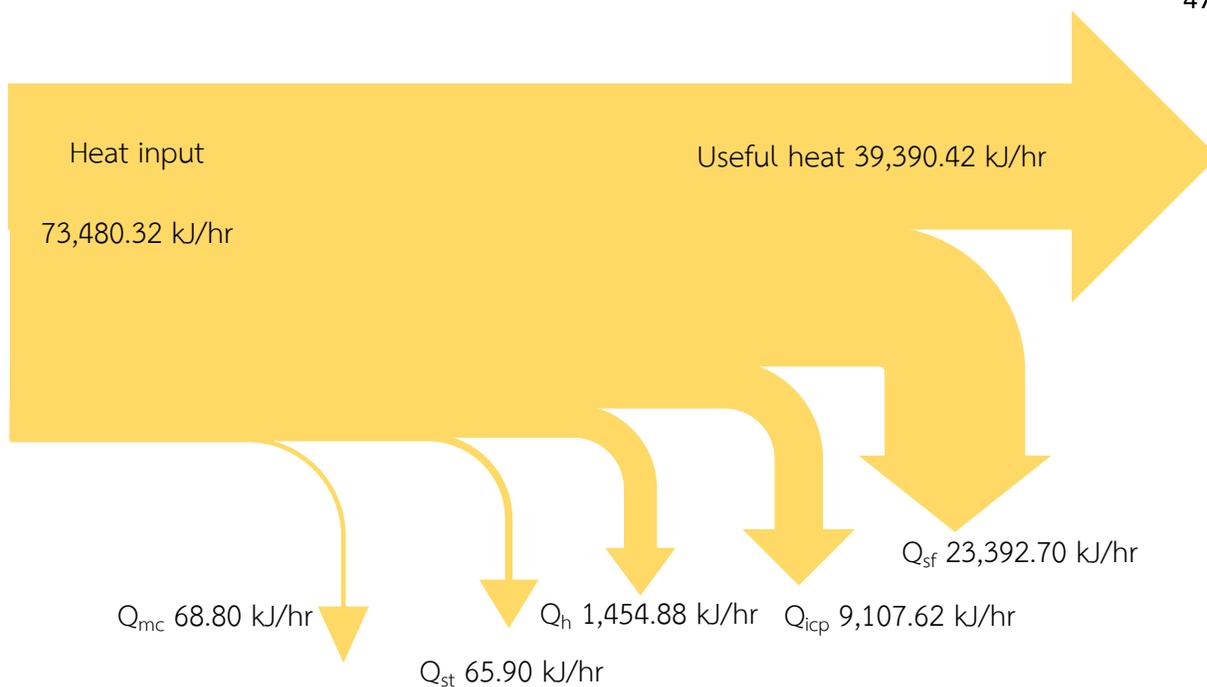
พลังงานความร้อน (%)	อุณหภูมิ		
	230 °C	250 °C	270 °C
พลังงานจากเชื้อเพลิง (%)	100.00	100.00	100.00
ความร้อนสูญเสียจากผนัง (%)	79.16	37.13	36.73
ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจน (%)	1.90	1.81	1.95
ความร้อนสูญเสียจากความชื้น (%)	0.10	0.11	0.10
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%)	12.39	12.39	12.39
ความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย (%)	0.22	0.09	0.08



รูปที่ 4.1 Sankey Diagram ของกระบวนการทอรีแฟคชั่นชีวมวลแกลบที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.2 Sankey Diagram ของกระบวนการทอรีแฟคชั่นชีวมวลแกลบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



รูปที่ 3 Sankey Diagram ของกระบวนการทอรีแฟคชั่นชีวมวลแกลบที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 1, 2 และ 3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความร้อนสูญเสียต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นส่งผลให้อุณหภูมิที่ผนังของเตาเผาแบบหมุน อุณหภูมิของแก๊สไอเสีย มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้เวลาเพื่อลึงอัดก้อนปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้ที่อุณหภูมิกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่สูง ค่าความร้อนสูญเสียจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยค่าความร้อนสูญเสียที่มากที่สุดคือ ค่าความร้อนสูญเสียที่ผิวเตาเผาแบบหมุน ดังนั้นเมื่อนำพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุนจากเชื้อเพลิงอัดก้อนหักด้วยค่าความร้อนสูญเสียต่างๆของเตาเผาแบบหมุน จะได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งค่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียจะถูกลบเป็นความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และจะพบว่าความเร็วรอบของการทดลองนั้นมีผลต่อค่าความร้อนสูญเสียที่น้อยมาก จะพบว่าค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยเมื่อเทียบกันที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียสนั้น จะพบว่า ถ้ากำหนดให้พลังงานที่เข้าเตาเผาแบบหมุนเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำค่าความร้อนสูญเสียของแต่ละส่วนมาดูจะได้ว่าที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าความร้อนสูญเสียจากผนังเตาเฉลี่ยเท่ากับ 77.10 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 1.90 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากการไหม้ไม่สมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 12.39 เปอร์เซ็นต์ และค่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียเท่ากับ 0.21 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียของแต่ละส่วนมาดูจะได้ว่าที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่า

ความร้อนสูญเสียจากผนังเตาเฉลี่ยเท่ากับ 40.06 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 1.90 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากการไหม้ไม่สมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 12.39 เปอร์เซ็นต์ และค่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียเท่ากับ 0.11 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียของแต่ละส่วนมาดูจะได้ว่าที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันที่ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าความร้อนสูญเสียจากผนังเตาเฉลี่ยเท่ากับ 30.18 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 1.94 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจากการไหม้ไม่สมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 12.39 เปอร์เซ็นต์ และค่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียเท่ากับ 0.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้พลังงานที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุนมีนั้นมากขึ้นด้วย แต่ค่าความร้อนสูญเสียจะมีเปอร์เซ็นต์ที่น้อยลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันที่ต่ำกว่า ทำให้พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์นั้นมีมากกว่า

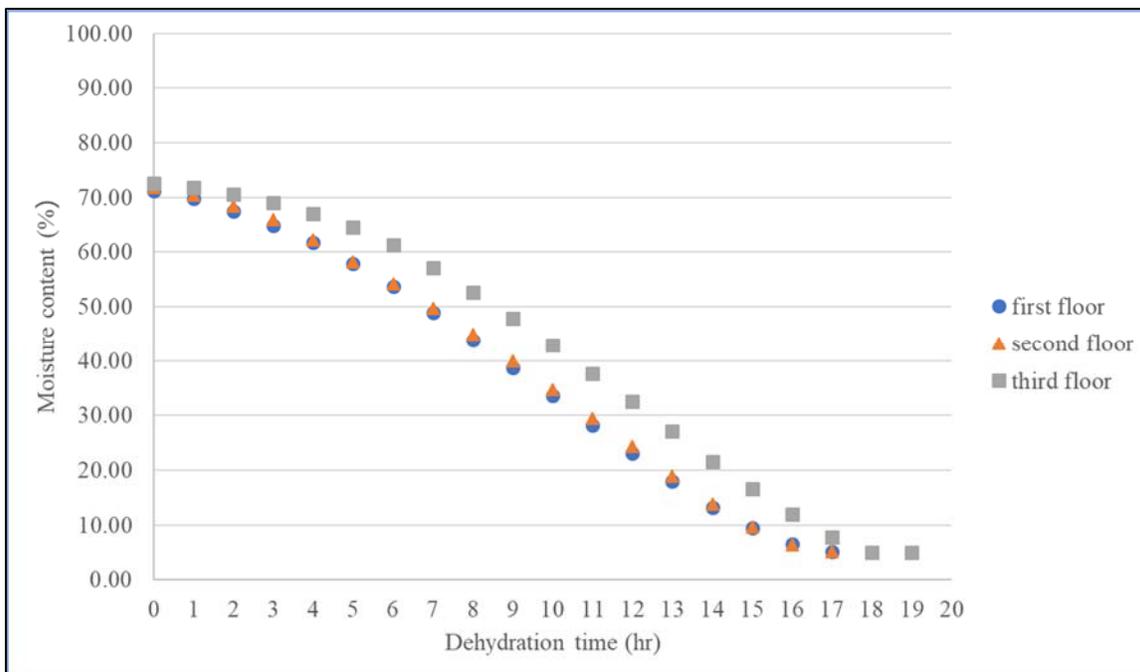
จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความร้อนสูญเสียของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยจะพบว่า ค่าความร้อนสูญเสียจากผนัง ค่าความร้อนสูญเสียจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ค่าความร้อนสูญเสียจากความชื้น ค่าความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสีย มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความร้อนสูญเสียที่มากที่สุดพบที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 270 องศาเซลเซียส และพบว่าค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผนัง โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 18,000 – 24,000 MJ/hr ซึ่งจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความร้อนสูญเสียที่ผนังเพิ่มมากขึ้นโดยค่าความร้อนสูญเสียจากผนังนั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันไม่มากเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมอยู่ที่ผนังนั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และที่ผนังได้ทำการหุ้มฉนวน (เซรามิคไฟเบอร์ blanket ทนอุณหภูมิสูงสุด 1,260 องศาเซลเซียส ค่าการนำความร้อน 0.110 W/m.K) ไว้รอบด้านเพื่อลดการนำความร้อนจากผนังของเตาเผาทำให้ อุณหภูมิที่ผิวดของเตาเผามีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชัน เมื่อเทียบค่าความร้อนสูญเสียของกระบวนการโดยให้ความร้อนขาเข้า(พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง) คิดเป็น 100% พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความร้อนสูญเสียมีค่าลดลง เนื่องมาจาก พลังงานความร้อนขาเข้าของแต่ละอุณหภูมิมีค่าที่ไม่เท่ากันโดยที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสมีค่าความร้อนขาเข้าสูงที่สุด เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ ความร้อนสูญเสียจะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความร้อนสูญเสียจะมีค่าลดลง เนื่องจากพลังงานขาเข้าที่นำมาคิดมีค่าตั้งต้นที่ไม่เท่ากัน อีกทั้งกระบวนการทอรีแฟคชันของเตาเผาชีวมวลแบบหมุน ความร้อนที่เข้าสู่ระบบจะเป็นระบบเปิด กล่าวคือความร้อนจะเคลื่อนตัวเข้าสู่เตาผ่านชีวมวล และออกสู่ปล่องไอเสียอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความร้อนสะสมภายในชีวมวลมีค่าไม่สูงต่างกันมากในแต่ละอุณหภูมิตดสอบอีกด้วย

4.2 การอบชีวมวลด้วยแก๊สไอเสียจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น

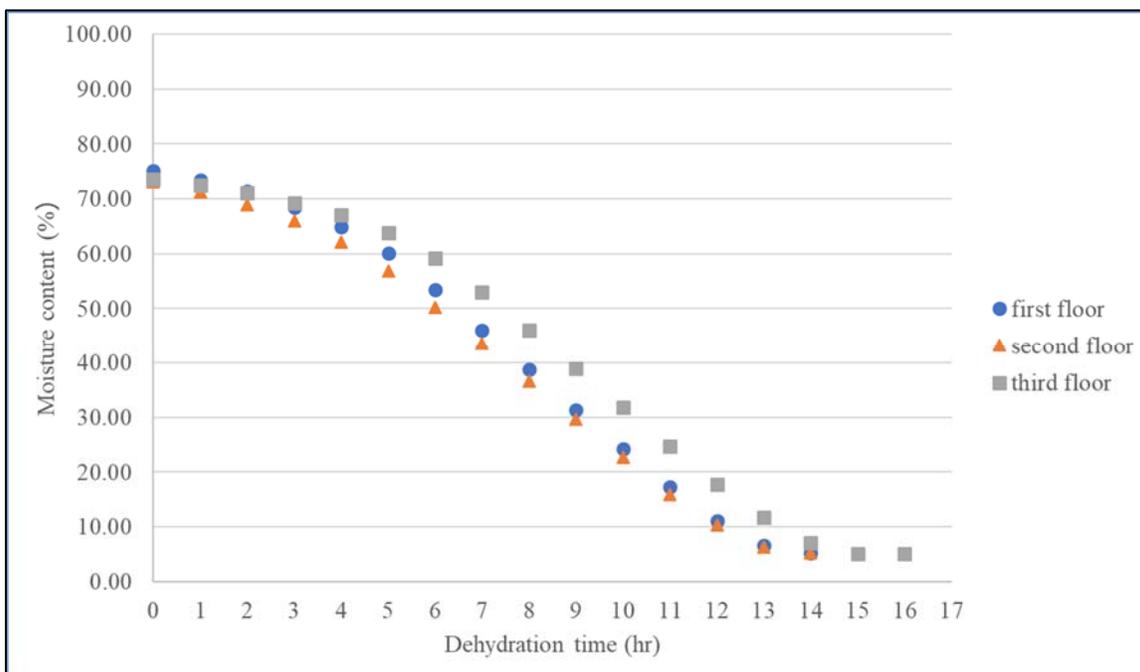
จากแผนภูมิน้ำหนักที่หายไปแสดงให้เห็นว่า เวลาในการอบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนใน 6 ชั่วโมงแรกนั้น น้ำหนักของชีวมวลอัดก้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะชีวมวลอัดก้อนมีความชื้นอยู่มาก หลังจากนั้นน้ำหนักของชีวมวลอัดก้อนจะลดลงอย่างช้าๆจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่และน้ำหนักจะไม่สามารถลดลงได้อีก โดยจะพิจารณา เวลาที่ใช้จากตำแหน่งที่ความแตกต่างของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับศูนย์ ($\Delta Y=0$) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ชีวมวลอัดก้อนมีค่าความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล ทำให้เวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบชีวมวลอัดก้อนจมน้ำหนักคงที่ โดยเวลาที่ใช้ในการอบชีวมวลจะแสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่า การอบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนโดยใช้แก๊สไอเสียจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 270 องศาเซลเซียสนั้นใช้เวลาในการอบน้อยที่สุด เนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะช่วยให้สามารถระเหยความชื้นได้ดีซึ่งจะทำให้การอบแห้งทำได้เร็วกว่า ความชื้นที่เหลืออยู่ของชีวมวลอัดก้อนแสดงให้เห็นว่า ความชื้นสุดท้ายของชีวมวลอัดก้อนทุกก้อนจะอยู่ที่ความชื้นสมดุลมีค่าเป็น 5% (wet basis) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 4.5 และ 4.66 จากแผนภูมิเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลืออยู่จะสังเกตได้ว่า เส้นแผนภูมิของตุ๋บในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในการทดสอบตำแหน่งที่วางชีวมวลอัดก้อนของชั้นที่ 1 และ 2 อยู่ในตำแหน่งรูลมเดียวกัน ทำให้ความสามารถในการระเหยความชื้นทำได้ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าความชื้นที่เหลือและเวลาที่ใช้ในการอบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนโดยใช้แหล่งความร้อนจากความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

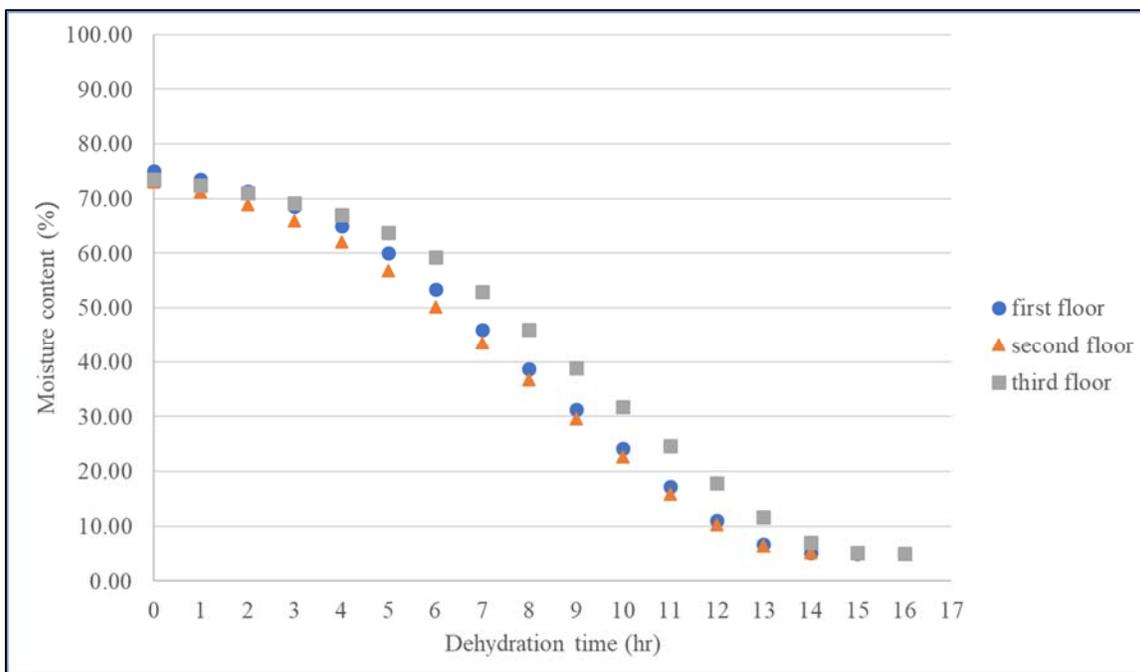
เวลาที่ ใช้ใน การอบ	ความชื้น (%)								
	แก๊สไอเสียจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 230 องศาเซลเซียส			แก๊สไอเสียจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 250 องศาเซลเซียส			แก๊สไอเสียจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 270 องศาเซลเซียส		
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
0	71.24	71.81	72.61	75.12	73.10	73.50	71.78	74.51	73.05
1	69.80	70.45	71.79	73.47	71.26	72.47	67.76	72.70	71.87
2	67.51	68.46	70.53	71.36	68.96	71.04	63.75	69.76	69.76
3	64.89	65.96	68.99	68.51	65.92	69.22	58.00	65.48	66.76
4	61.68	62.21	66.93	64.97	62.15	67.01	50.85	59.28	62.65
5	57.93	58.18	64.55	60.09	56.88	63.84	43.28	50.63	56.88
6	53.66	54.17	61.29	53.42	50.17	59.25	35.54	41.81	49.64
7	48.89	49.71	57.13	46.07	43.59	53.02	27.56	32.95	41.77
8	43.87	44.89	52.54	38.74	36.66	46.00	20.28	24.75	34.41
9	38.76	39.89	47.87	31.33	29.64	38.93	10.45	16.85	26.78
10	33.55	34.75	42.90	24.24	22.62	31.85	8.06	10.04	19.32
11	28.22	29.44	37.69	17.25	15.86	24.64	5.47	5.88	12.39
12	23.05	24.25	32.49	11.13	10.28	17.80	5.30	5.38	7.07
13	17.96	18.89	27.03	6.68	6.34	11.74	5.01	5.01	5.05
14	13.18	13.79	21.52	5.17	5.20	7.08	5.01	5.01	5.010
15	9.40	9.55	16.53	5.01	5.01	5.11			
16	6.56	6.38	11.96	5.01	5.01	5.01			
17	5.19	5.15	7.76						
18	5.01	5.01	5.06						
19	5.01	5.01	5.01						



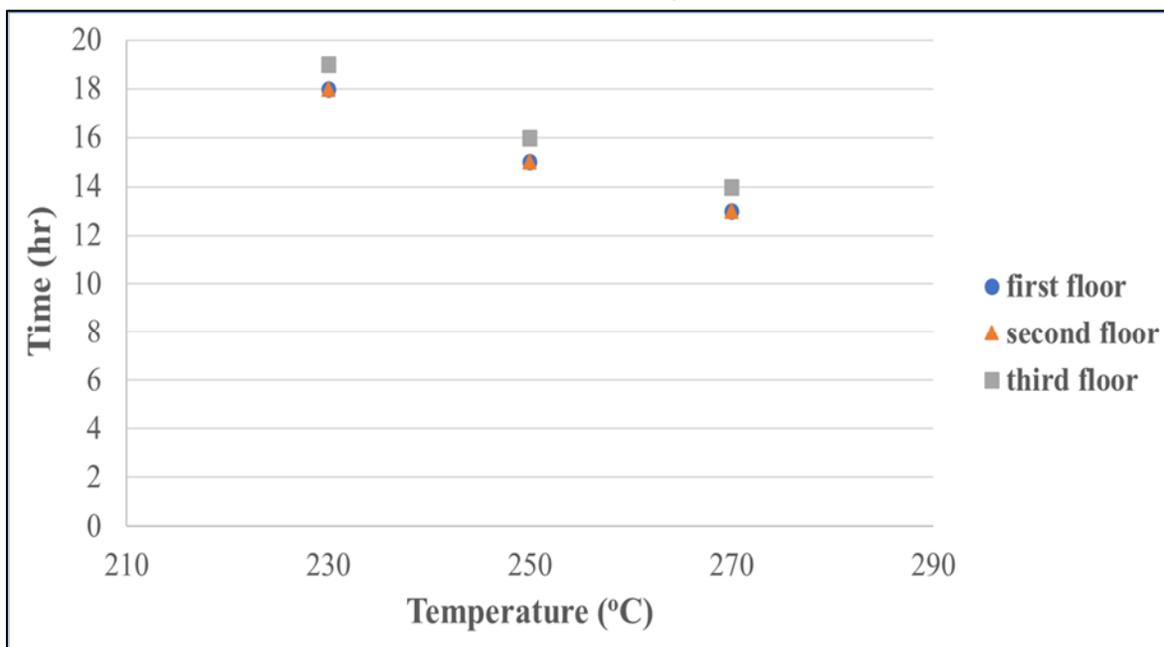
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนที่อบด้วยแก๊สไอเสีย
จากกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนที่อบด้วยแก๊สไอเสีย
จากกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนที่อบด้วยแก๊สไอเสีย
จากกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 จำนวนชั่วโมงที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแพคชั้นที่ 230 องศาเซลเซียสจะใช้เวลาในการอบเพื่อลดความชื้นจนเหลือความชื้นคงที่ที่ 5.01% โดยใช้เวลามากที่สุดคือ 19 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสใช้เวลาทั้งสิ้น 16 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสใช้เวลาทั้งสิ้น 14 ชั่วโมง กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแพคชั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แก๊สไอเสียที่ได้จากกระบวนการทอรีแพคชั้นนั้นมีความสูงขึ้นไปด้วย ซึ่งที่อุณหภูมิของแก๊สไอเสียที่สูงนั้น จะทำให้ความชื้นภายในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนนั้นลดลงได้ไวตามไปด้วย ทำให้แก๊สไอเสียที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นใช้ชั่วโมงในการอบเชื้อเพลิงสั้นที่สุด คือ 13 ชั่วโมง

4.3 ต้นทุนของกระบวนการทอรีแพคชั้นโดยใช้เตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั้น

การผลิตชีวมวลทอรีไฟร์โดยใช้เตาเผาแบบหมุนมีค่าใช้จ่ายหลายส่วนด้วยกัน เช่น ค่าเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ ค่าไฟฟ้า เป็นต้น โดยจะแสดงดังในตารางโดยแบ่งเป็นชีวมวลทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ ชังข้าวโพด และกะลาปาล์ม โดยแหล่งพลังงานที่ใช้ให้แก่เตาเผาแบบหมุน คือ ชีวมวลอัดก้อนจากซีลื้อยผสมกระดาษ ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองคือ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 การคำนวณต้นทุนการผลิตชีวมวลทอรีไฟร์จากแกลบ โดยใช้เชื้อเพลิงอัดก้อนเป็นเชื้อเพลิง

แกลบ							
ความเร็วรอบ	อุณหภูมิ	กำลังการผลิต (กก/ชม)	ค่าวัตถุดิบ (บาท/กก)	ค่าแรงงาน (บาท/กก)	ค่าชีวมวลอัดก้อน (บาท/กก)	ค่าไฟฟ้า (บาท/กก)	รวมต้นทุน
3 rpm	230	6.78	0.01	5.531	0.487	1.705	7.733
	250				0.855		8.101
	270				1.224		8.47
2 rpm	230	6.03	0.01	6.219	0.547	1.917	8.693
	250				0.962		9.108
	270				1.376		9.522
1 rpm	230	2.604	0.01	14.401	1.267	4.439	20.117
	250				2.227		21.077
	270				3.187		22.037

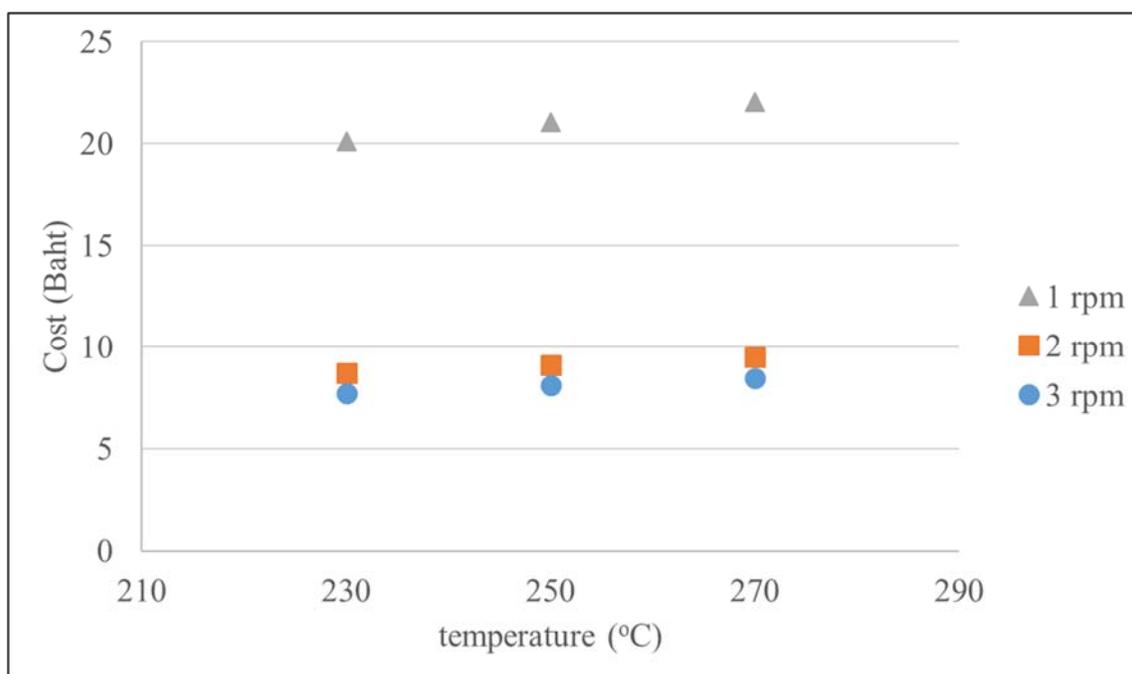
ตารางที่ 4.12 การคำนวณต้นทุนการผลิตชีวมวลทอริไฟร์จากซังข้าวโพด โดยใช้เชื้อเพลิงอัดก้อนเป็นเชื้อเพลิง

ซังข้าวโพด							
ความเร็วรอบ	อุณหภูมิ	กำลังการผลิต (กก/ชม)	ค่าวัตถุดิบ (บาท/กก)	ค่าแรงงาน (บาท/กก)	ค่าชีวมวลอัดก้อน (บาท/กก)	ค่าไฟฟ้า (บาท/กก)	รวมต้นทุน
3 rpm	230	19.74	0.01	1.9	0.167	0.586	2.663
	250				0.294		2.79
	270				0.42		2.916
2 rpm	230	15.07	0.01	2.488	0.219	0.767	3.484
	250				0.385		3.65
	270				0.42		3.685
1	230	4.68	0.01	8.013	0.705	2.47	11.198
	250				1.239		11.732
	270				1.774		12.267

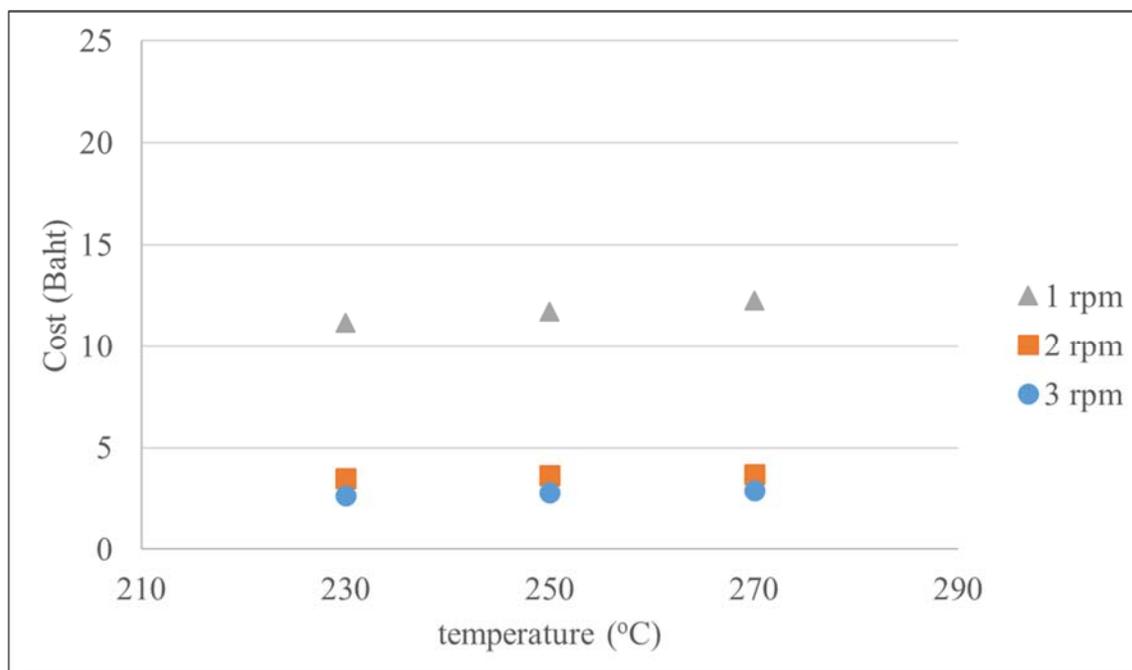
ตารางที่ 4.13 การคำนวณต้นทุนการผลิตชีวมวลทอริไฟร์จากกะลาปาล์ม โดยใช้เชื้อเพลิงอัดก้อนเป็นเชื้อเพลิง

กะลาปาล์ม							
ความเร็วรอบ	อุณหภูมิ	กำลังการผลิต (กก/ชม)	ค่าวัตถุดิบ (บาท/กก)	ค่าแรงงาน (บาท/กก)	ค่าชีวมวลอัดก้อน (บาท/กก)	ค่าไฟฟ้า (บาท/กก)	รวมต้นทุน
3	230	20.69	0.01	1.81	0.16	0.59	2.57
	250				0.28		2.69
	270				0.40		2.81
2	230	13.03	0.01	2.88	0.25	0.77	3.91
	250				0.45		4.10
	270				0.64		4.29
1	230	5.52	0.01	6.79	0.60	2.47	9.87
	250				1.05		10.32
	270				1.50		10.78

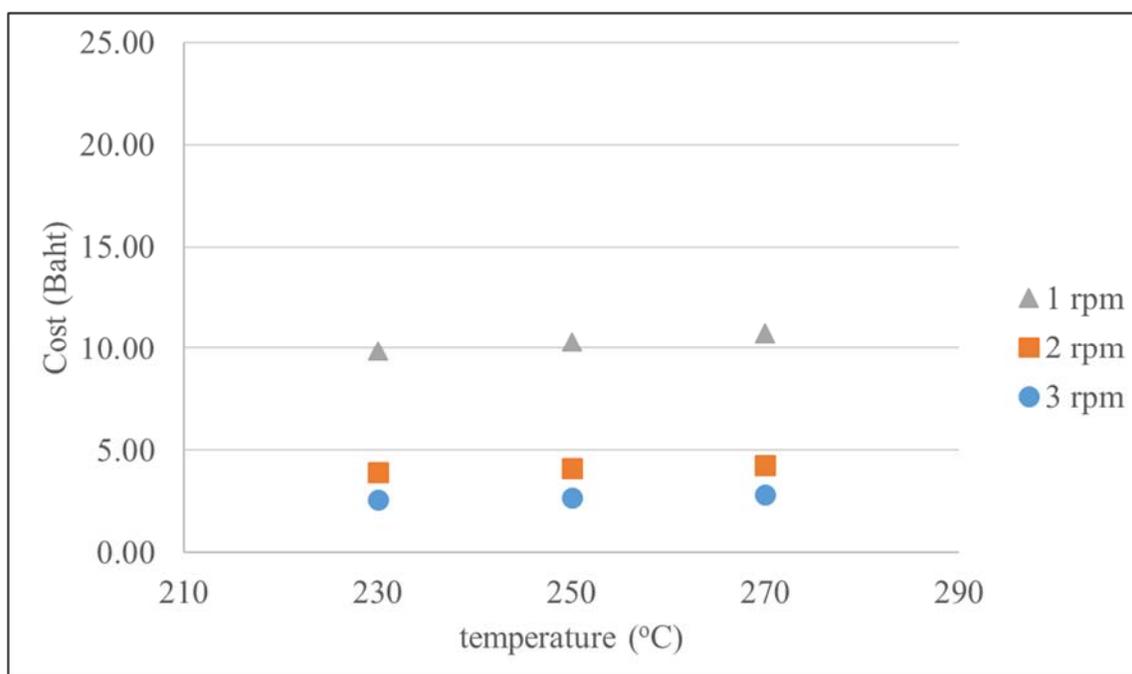
จากตาราง 4.11 - 4.13 แสดงการคำนวณต้นทุนการผลิตชีวมวลทอริไฟร์จากแกลบ ชังข้าวโพด และกะลาปาล์ม โดยใช้ชีวมวลอัดก้อนเป็นแหล่งความร้อน พบว่า ต้นทุนของชีวมวลทอริไฟร์ขึ้นอยู่กับ ชนิดของชีวมวลที่นำมาทอริไฟร์ อุณหภูมิ และความเร็วยรอบที่ใช้ในกระบวนการทอริไฟร์แพคชั่น โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลให้อัตราการเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนแตกต่างกัน ยิ่งอุณหภูมิสูง อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนก็จะสูงขึ้นเช่นกัน ในขณะที่ความเร็วยรอบที่ใช้ในกระบวนการทอริไฟร์แพคชั่นแตกต่างกันส่งผลให้กำลังการผลิตแตกต่างกันออกไป เมื่อความเร็วยรอบมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้กำลังการผลิตมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งกำลังการผลิตนั้นมีผลต่อค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในกระบวนการทอริไฟร์แพคชั่น ได้แก่ ค่าชีวมวลอัดก้อน ค่าแรงงาน และ ค่าไฟฟ้า โดยเมื่อกำลังการผลิตสูงจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยต่ำ ในทางตรงกันข้ามกำลังการผลิตที่ต่ำจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยสูงขึ้น โดยจากรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 จะพบว่า แนวโน้มของต้นทุนของกระบวนการทอริไฟร์แพคชั่นมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความเร็วยรอบของกระบวนการทอริไฟร์แพคชั่นเพิ่มขึ้น โดยจากกราฟจะพบว่า กะลาปาล์มนั้นจะมีกำลังการผลิตที่สูงที่สุด ส่งผลให้ต้นทุนรวมของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นจึงมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแกลบ และ ชังข้าวโพด



รูปที่ 4.8 ต้นทุนรวมของกระบวนการทอริไฟร์แพคชั่นแกลบ



รูปที่ 4.9 ต้นทุนรวมของกระบวนการทอรีแฟคชั่นซึ่งข้าวโพด



รูปที่ 4.10 ต้นทุนรวมของกระบวนการทอรีแฟคชั่นกะลาปาล์ม

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเร็วรอบของกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กำลังการผลิตของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการนั้นลดลง โดยเปรียบเทียบจากจำนวนชั่วโมงต่อวันที่เท่ากันจะพบว่าที่ความเร็วรอบที่มากกว่านั้นจะมีปริมาณของชีวมวลจากการผลิตต่อชั่วโมงที่มากกว่า เมื่อคิดเป็นปริมาณต่อวันทำให้ที่ความเร็วรอบ 3 มากกว่าที่ 1 และ 2 รอบต่อนาที และเมื่อเปรียบเทียบจากชนิดของชีวมวลจะเห็นว่าชีวมวลแต่ละชนิดนั้นจะมีกำลังการผลิตที่ไม่เท่ากันในแต่ละความเร็วรอบ ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในหน่วย บาท/กิโลกรัม จะพบว่า ที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายต่อวันเท่ากันนั้นนำมาเปรียบเทียบในหน่วย บาท/กิโลกรัม ส่งผลให้ที่ความเร็วรอบที่มากกว่านั้นมีค่าใช้จ่ายที่ลดลง คือ ค่าแรงงาน ค่ามัดมัดก้อน และค่าไฟฟ้า มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบที่ต่ำ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วรอบของกระบวนการนั้นมีผลต่อต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมากโดยความเร็วรอบยิ่งสูงจะส่งผลให้กำลังการผลิตสูงขึ้นตามและต้นทุนลดลงตามไปด้วย

4.4 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

ชีวมวลดิบหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันจะแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยจากรูปจะแสดงถึงชีวมวลดิบกลบซึ่งข้าวโพด และกะลาปาล์ม ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยจะสังเกตเห็นว่า ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นจะมีลักษณะสีดำคล้ำเย้นเนื่องจากในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นเป็นกระบวนการไพโรไลซิสอย่างอ่อนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการเผาถ่าน แต่ใช้อุณหภูมิในกระบวนการที่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้ชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีสีดำคล้ำเย้น และสามารถสังเกตเห็นว่าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าชีวมวลดิบเนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวของพันธะทางเคมีและความชื้นภายในชีวมวล จึงส่งผลให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นมีขนาดเล็กกลง



(a) แกลบก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน



(b) ชังข้าวโพดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

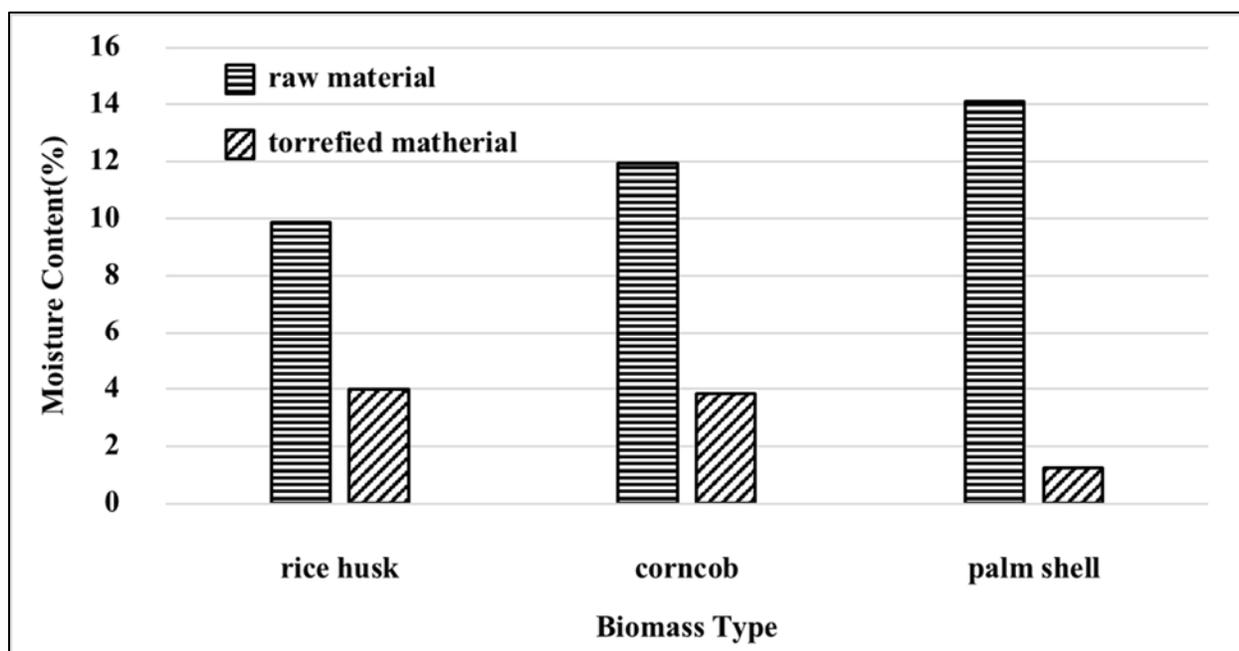


(c) กะลาปาล์มก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

รูปที่ 4.11 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลก่อนและผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

4.5 ความชื้น

รูปที่ 4.12 แสดงถึงค่าความชื้นของชีวมวลดิบแกลบ ชังข้าวโพด และกะลาปาล์ม ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น จากการทดลองพบว่าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นจะมีค่าความชื้นที่น้อยกว่าชีวมวลดิบ เนื่องมาจากความชื้นของชีวมวลบางส่วนนั้นได้ระเหยไปในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่น จากกราฟจะเห็นว่าค่าความชื้นของชีวมวลทอรีไฟร์จะมีค่าน้อยกว่าของชีวมวลดิบ โดยค่าความชื้นของแกลบมีค่าเท่ากับ 9.87 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นเฉลี่ยของแกลบทอรีไฟร์นั้นมีค่าเท่ากับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าชีวมวลดิบถึงถึง 61.20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นของชังข้าวโพดก่อนทอรีไฟร์มีค่าเท่ากับ 11.93 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นเฉลี่ยของชังข้าวโพดทอรีไฟร์มีค่าเท่ากับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นของกะลาปาล์มก่อนทอรีไฟร์มีค่าเท่ากับ 14.10 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นเฉลี่ยของกะลาปาล์มทอรีไฟร์มีค่าเท่ากับ 1.24 เปอร์เซ็นต์ซึ่งค่าความชื้นของชังข้าวโพดทอรีไฟร์มีค่าน้อยกว่าชีวมวลดิบถึง 91.20 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลเนื่องมาจากการที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในชีวมวลเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะเกิดการสลายตัว ส่งผลให้สูญเสียความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นมีความชื้นที่ลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบ โดยในตารางที่ 4.14 จะแสดงค่าของความชื้นของชีวมวลดิบ และค่าความชื้นเฉลี่ยของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยค่าความชื้นของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นจะเป็นค่าความชื้นที่น่าทุกสภาวะของกระบวนการทอรีแฟคชั่นมาเฉลี่ย เนื่องจากค่าความชื้นหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.12 ความชื้นของชีวมวลก่อนและหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ตารางที่ 4.14 ค่าความชื้นของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

	raw material	torrefied material
rice husk	9.87	3.98
corn cob	11.93	3.83
palm shell	14.1	1.24

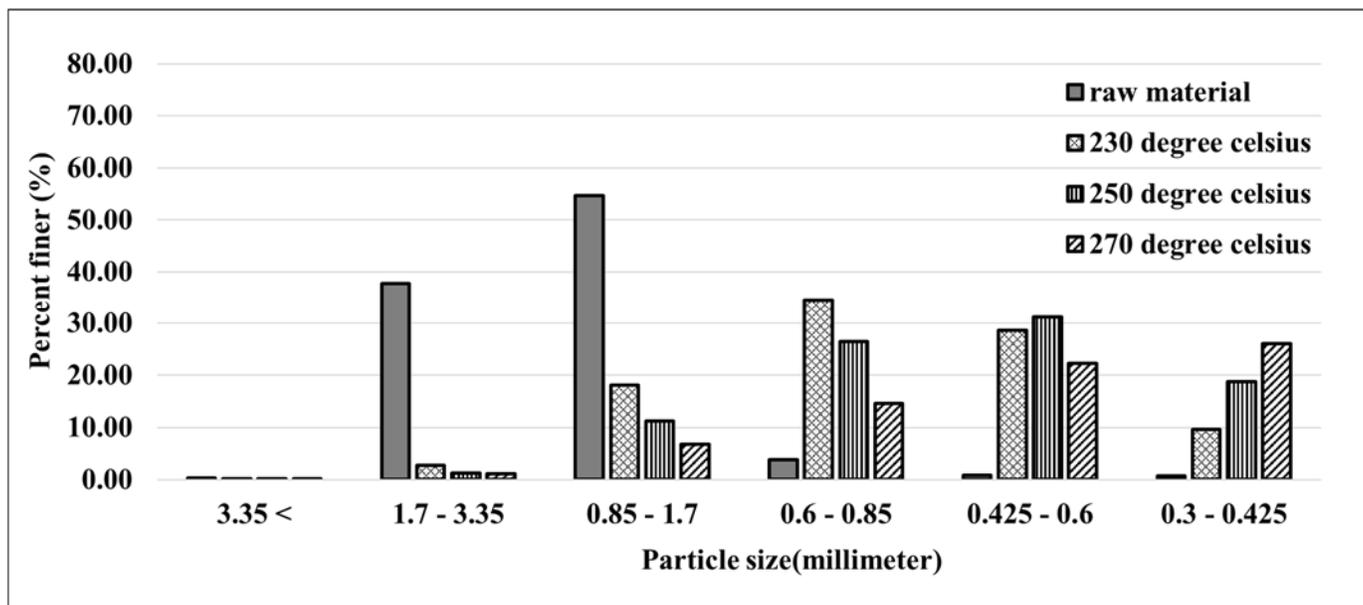
4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

4.6.1 แกลบ

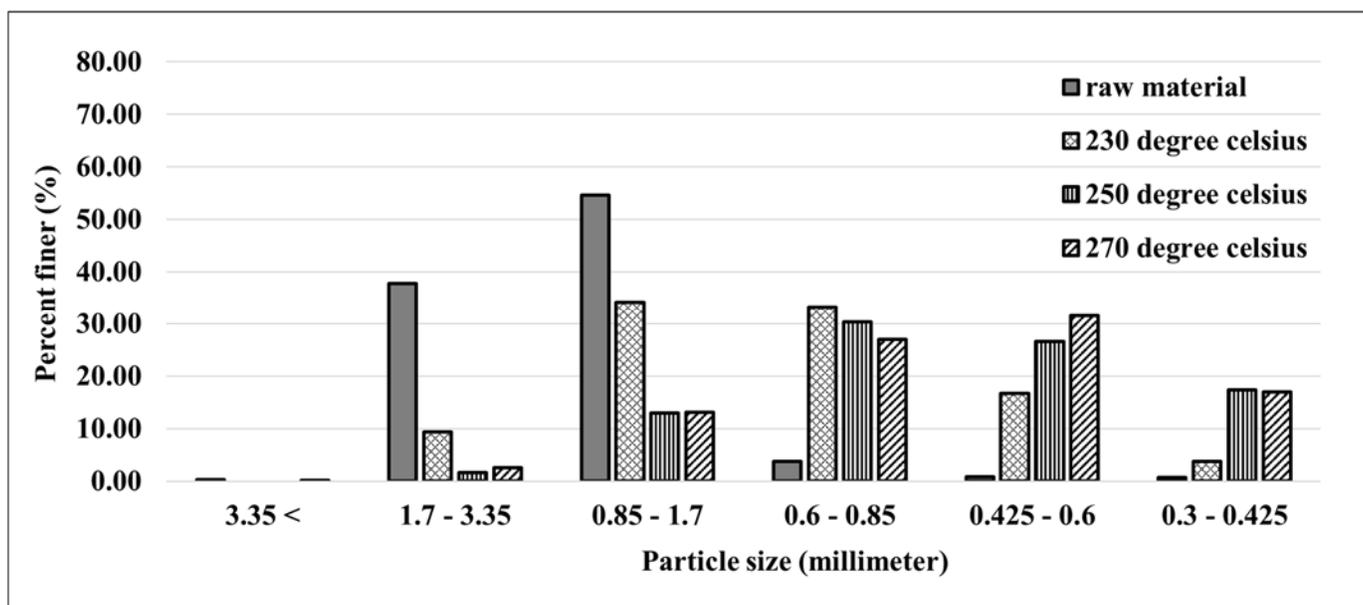
4.6.1.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อ นาที

ในการศึกษาการทอรีแฟคชันที่เงื่อนไขต่างๆในเตาเผาชีวมวลทอรีไฟร์แบบหมุน และนำค่าชีวมวลก่อนและหลังการทอรีไฟร์มาทำการทดลองหาค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวล ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D422 โดยเครื่องคัดแยกอนุภาค จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

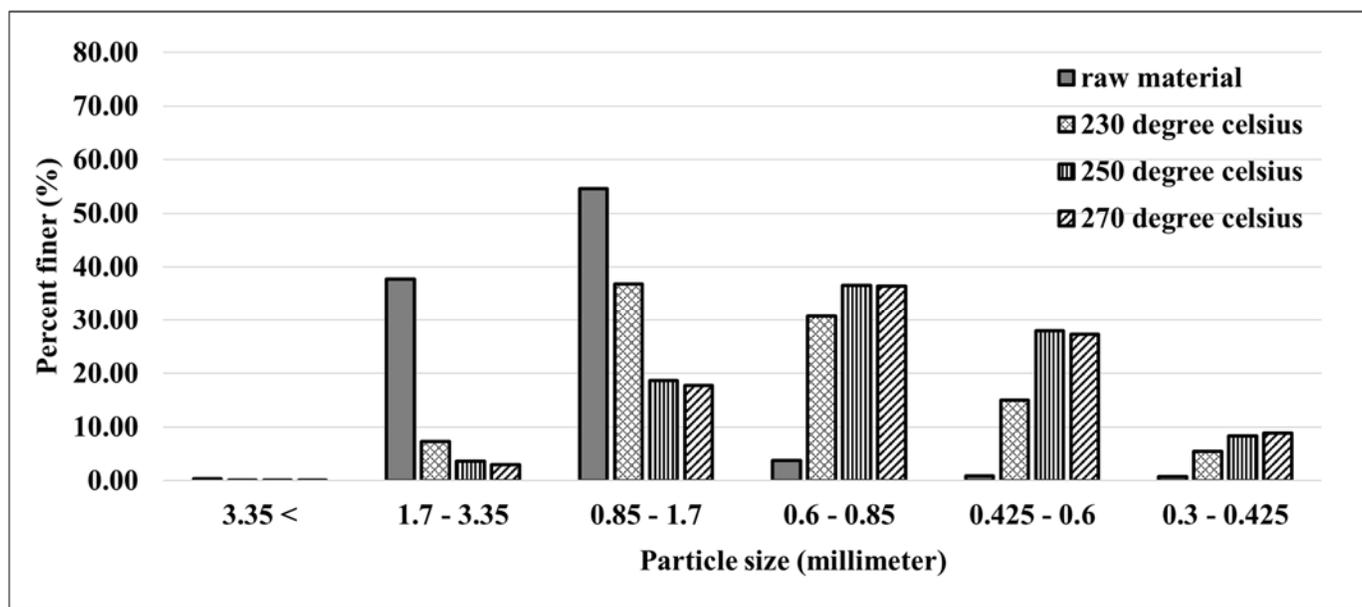
รูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลแกลบทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของชีวมวลดิบตามลำดับ โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดอนุภาคของชีวมวลทอรีไฟร์นั้นจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของชีวมวลดิบ โดยเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันมีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กที่มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น และจากกราฟจะพบว่าชีวมวลทอรีไฟร์นั้นมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กที่มากกว่าของชีวมวลดิบอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ 270 องศาเซลเซียสนั้นมีขนาดอนุภาคในช่วง 0.3 – 0.425 มิลลิเมตรเท่ากับ 26.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 9.53 และ 18.78 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้น จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ 270 องศาเซลเซียสนั้นมีขนาดอนุภาคในช่วง 0.425 – 0.6 มิลลิเมตรเท่ากับ 31.55 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 16.77 และ 26.63 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และที่ ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้น จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิทอรีไฟร์ 250 และ 270 องศาเซลเซียสนั้นมีขนาดอนุภาคในช่วง 0.6 – 0.85 มิลลิเมตรที่ใกล้เคียงกันคือ 36.62 และ 36.50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 30.67 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกรบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกรบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

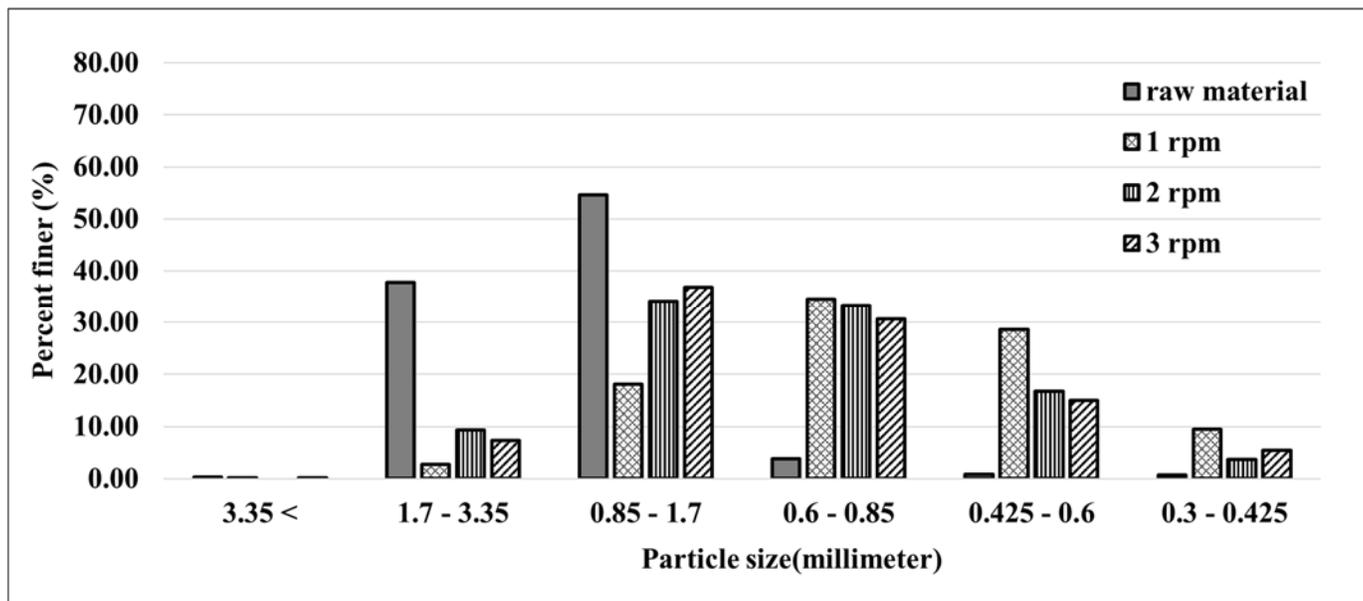


รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแคลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

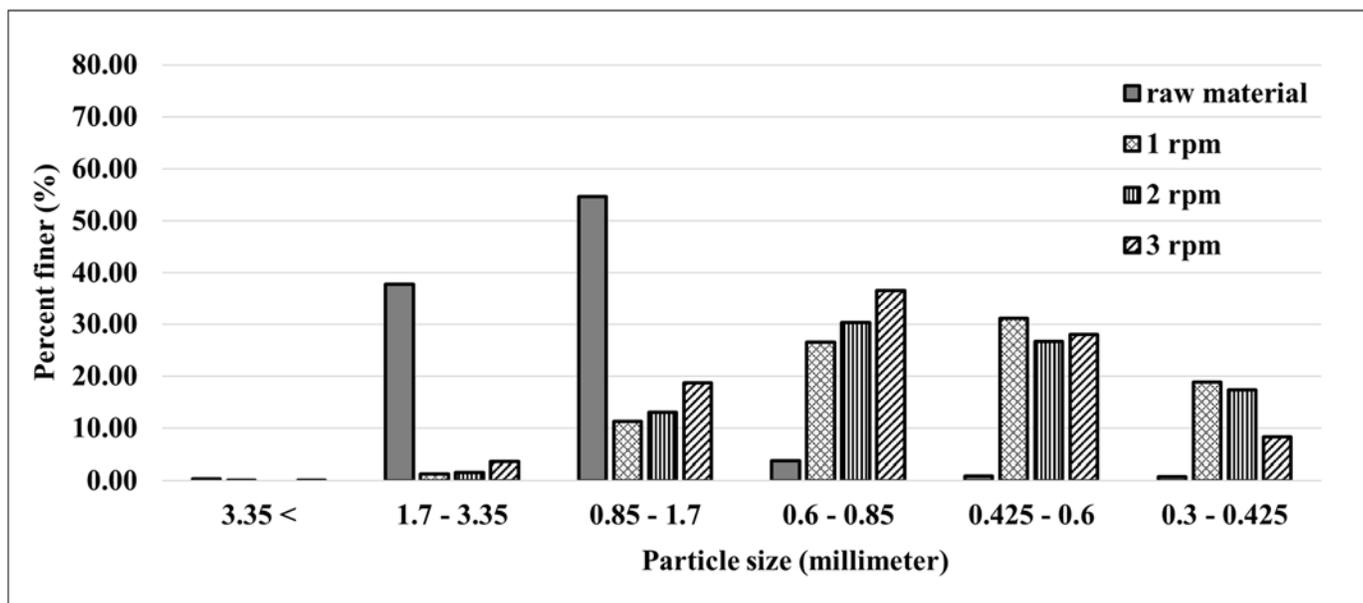
4.6.1.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแคลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลแคลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของชีวมวลดิบนั้นจะถูกแสดงอยู่ดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่า การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชีวมวลดิบ โดยที่ความเร็วรอบในการหมუნของเตาเผาแบบหมუნนั้นมีค่าลดลง จะส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจาก เมื่อความเร็วรอบในการหมუნของเตาเผาแบบหมუნนั้นมีค่าลดลง จะส่งผลให้ระยะเวลาที่ชีวมวลนั้นอยู่ภายในเตาเผาแบบหมუნนั้นนานมากขึ้น เป็นผลให้ชีวมวลนั้นได้รับความร้อนจากเตาเผาแบบหมუნเป็นเวลานานกว่าที่ความเร็วรอบการหมუნเตาเผาที่สูง โดยที่ความเร็วรอบการหมუნเตาเผาที่ต่ำนั้นชีวมวลจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้นานกว่าที่ความเร็วรอบการหมუნเตาเผาที่สูงทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวมากขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะสังเกตเห็นว่าขนาดอนุภาคในช่วง 0.425 – 0.6 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ถึง 28.54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าที่ความเร็วรอบ 2 และ 3 รอบที่มีค่าอยู่ที่ 16.77 และ 15.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าขนาดอนุภาคในช่วง 0.3 – 0.425 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 18.78 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าที่ความเร็วรอบ 2 และ 3 รอบต่อนาทีที่มีค่าอยู่ที่ 17.34 และ 8.28 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าขนาดอนุภาคในช่วง 0.3

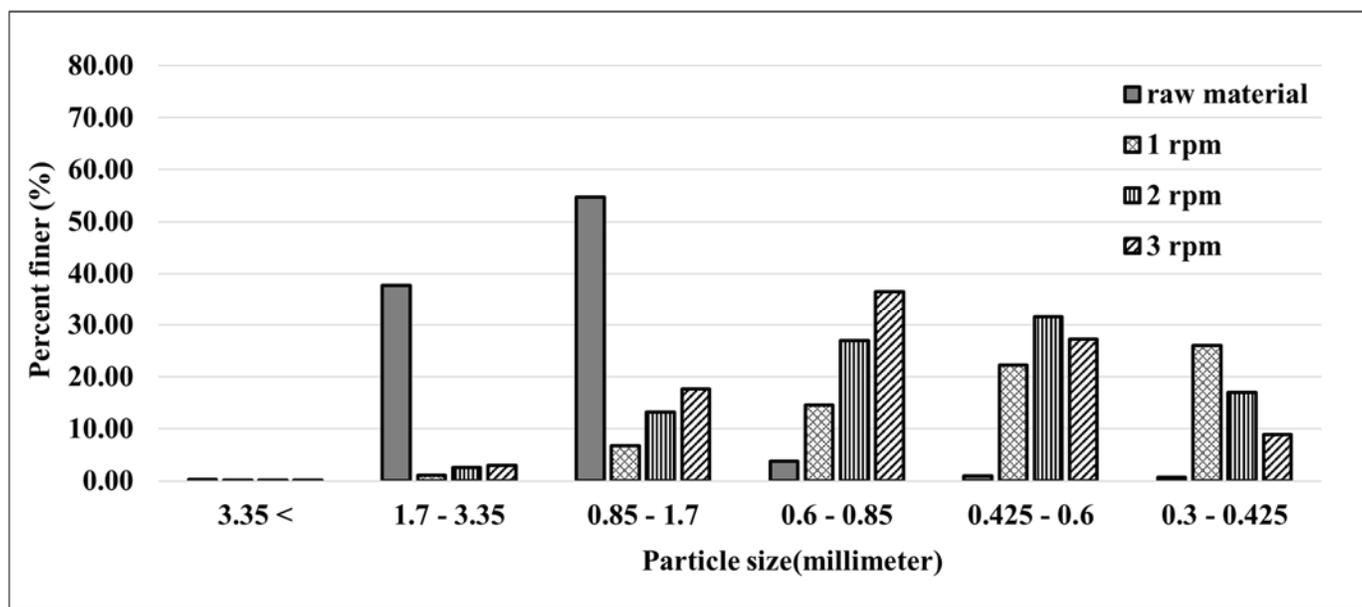
- 0.425 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที มีค่าเท่ากับ 26.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าที่ความเร็วรอบ 2 และ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.97 และ 8.92 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

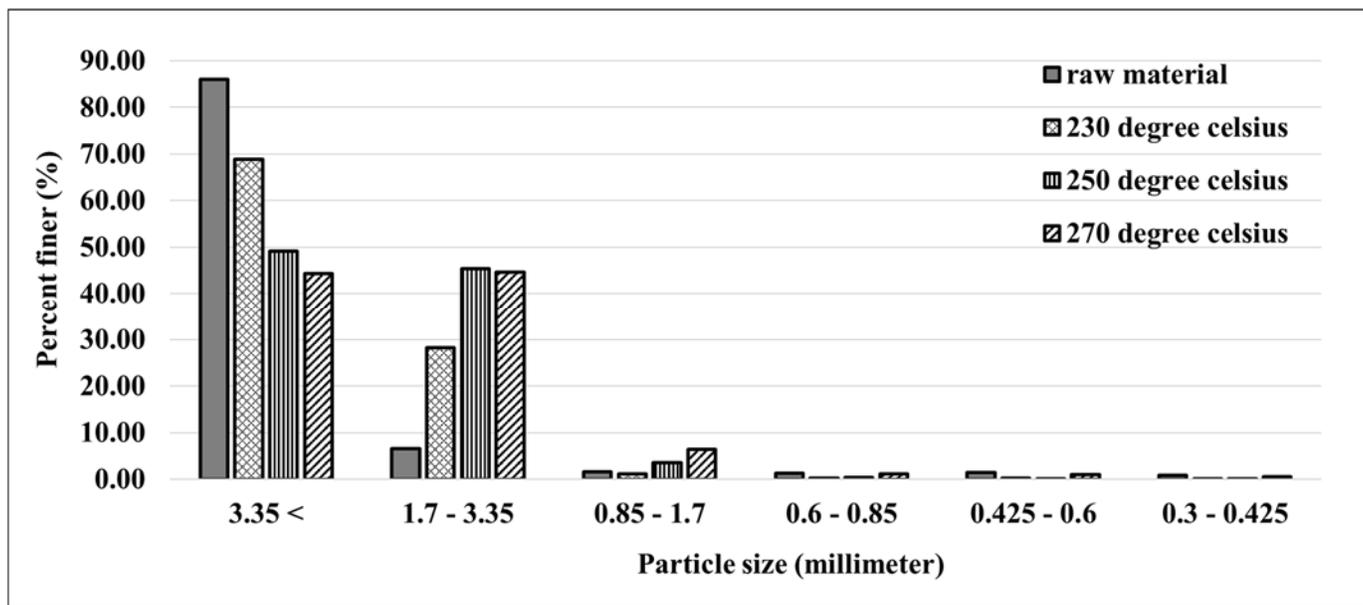


รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

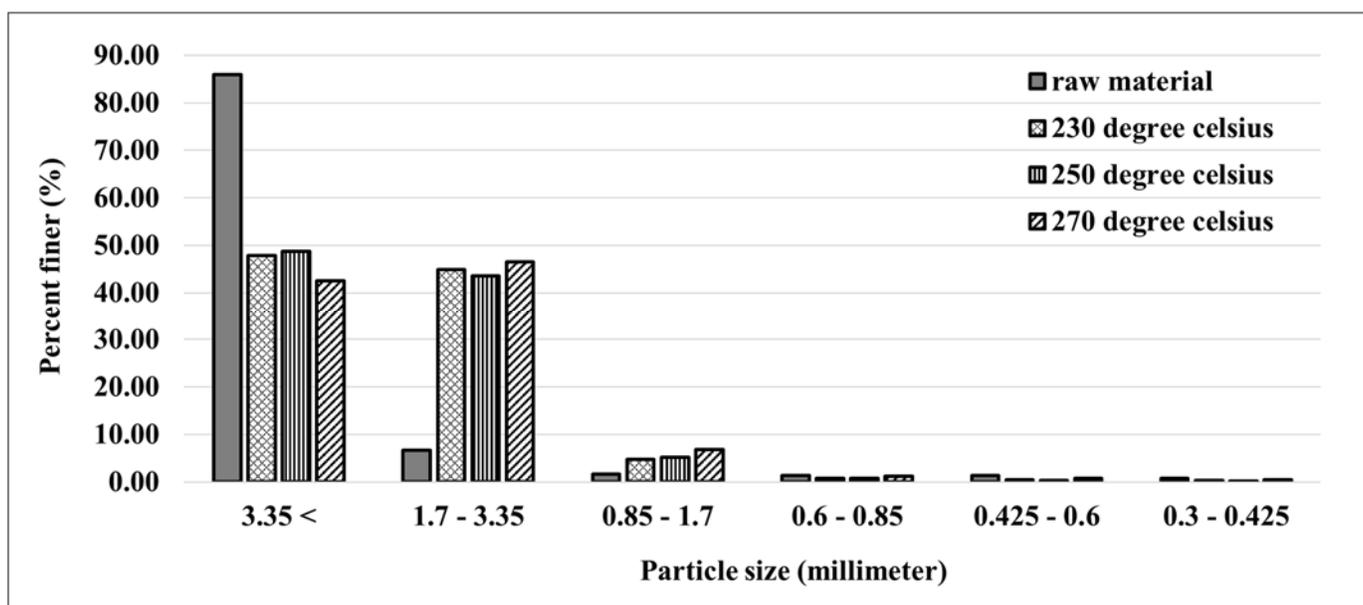
4.6.2. ชั่งข้าวโพด

4.6.2.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที

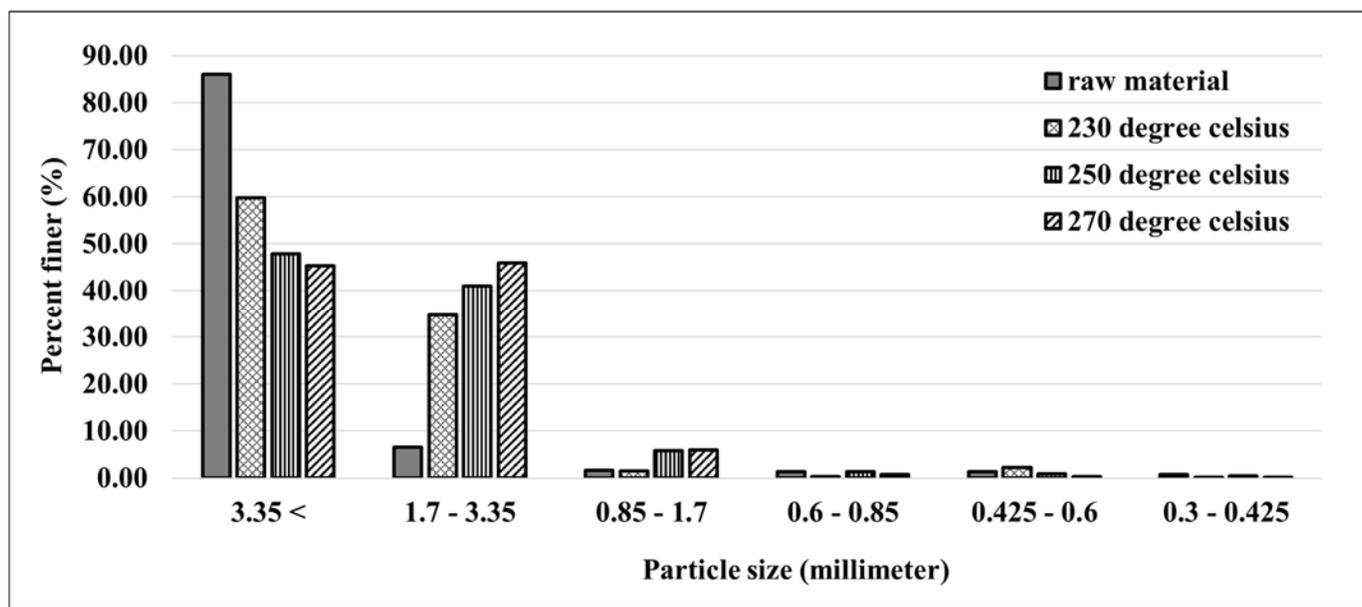
รูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของชีวมวลดิบชั่งข้าวโพด โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคชีวมวลทอริไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอริแฟคชันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการสลายตัวของชีวมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 1.7 - 3.35 มิลลิเมตรจะพบว่า ชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



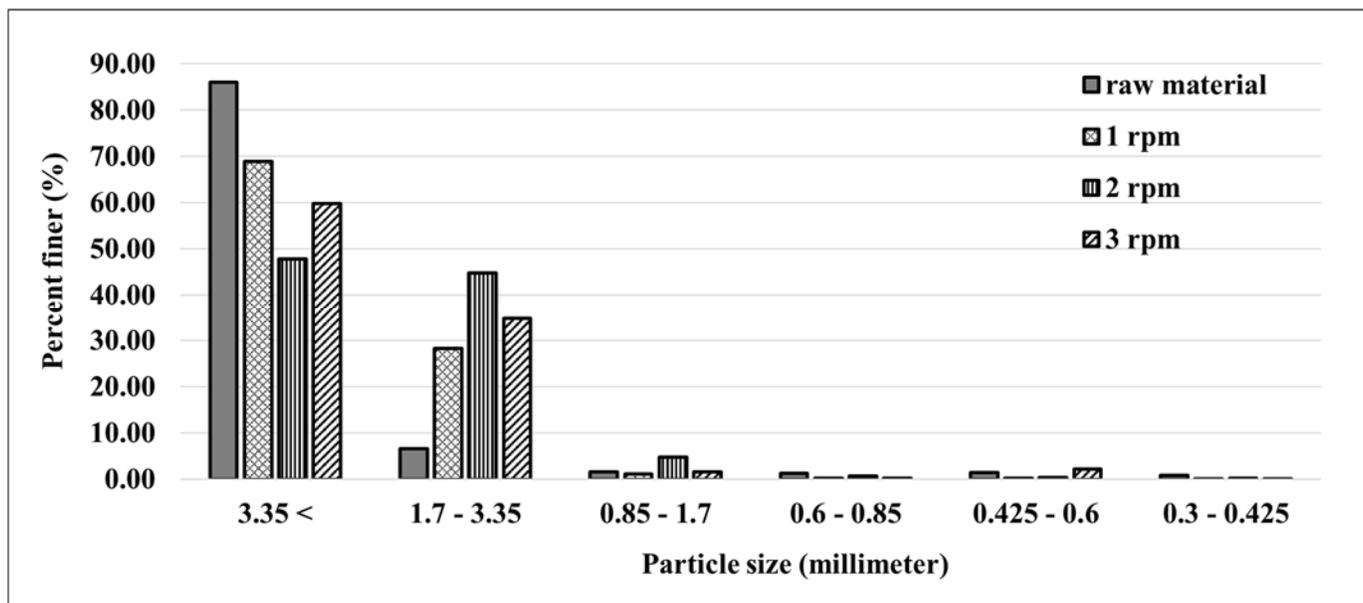
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที



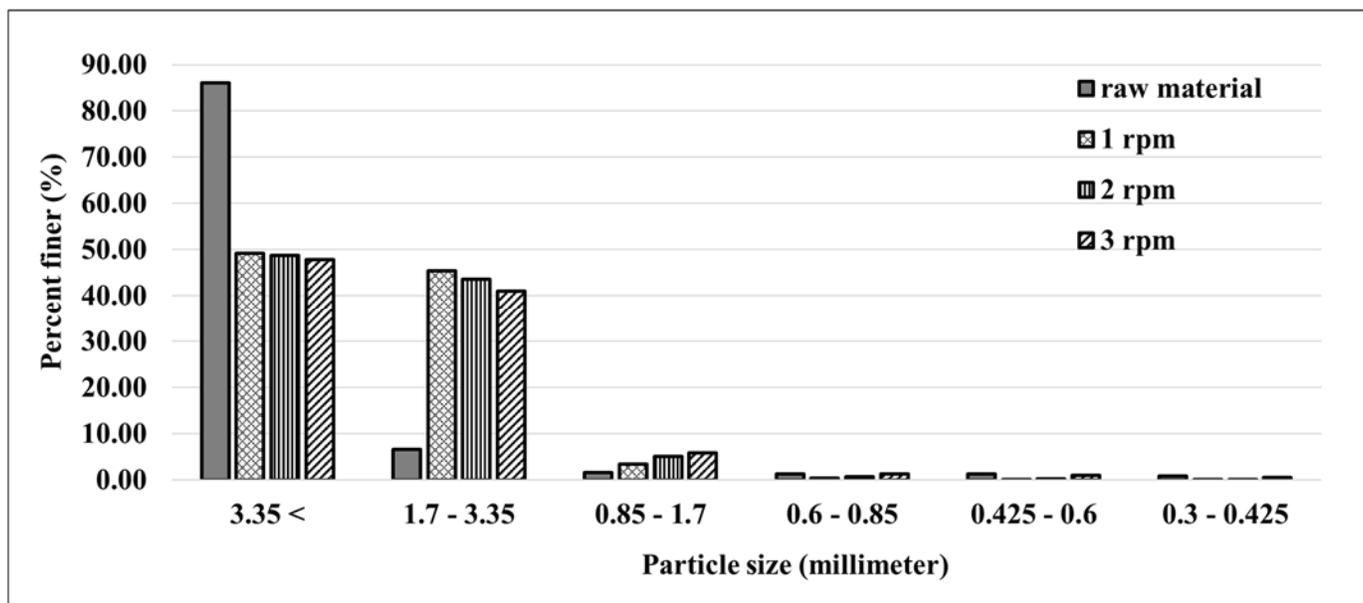
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.6.2.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส

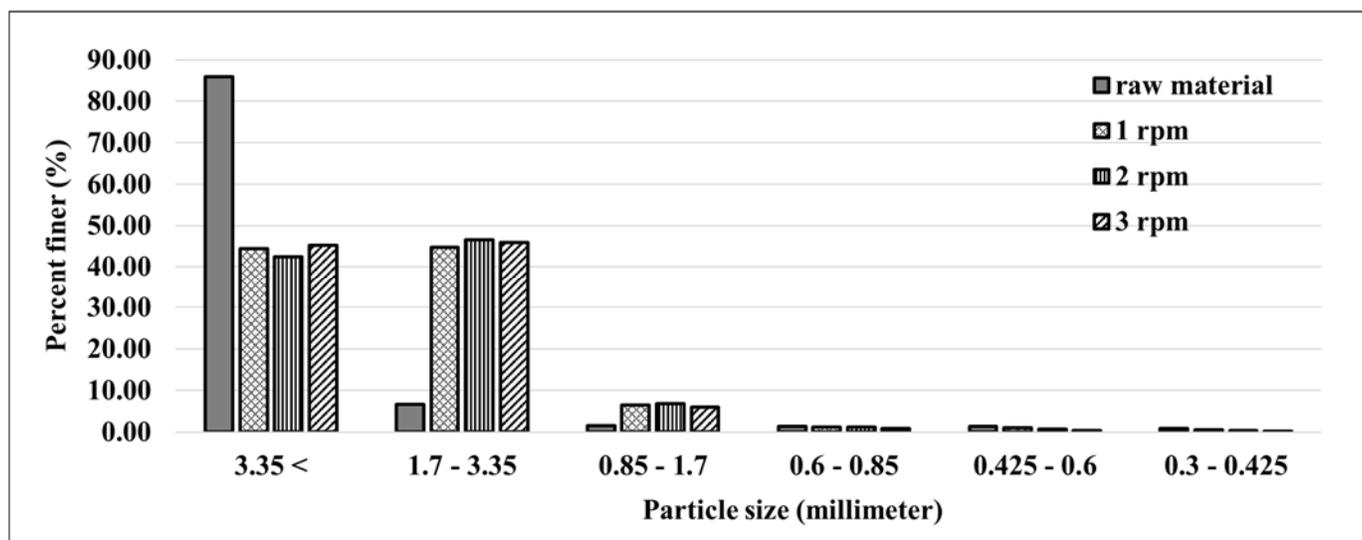
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของชีวมวลดิบนั้นจะแสดงอยู่ดังรูปที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคซังข้าวโพดทอริไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง ส่งผลให้ชีวมวลได้รับความร้อนนานขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้นานขึ้นทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 1.7 – 3.35 มิลลิเมตรจะพบว่า ชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคขังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคขังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

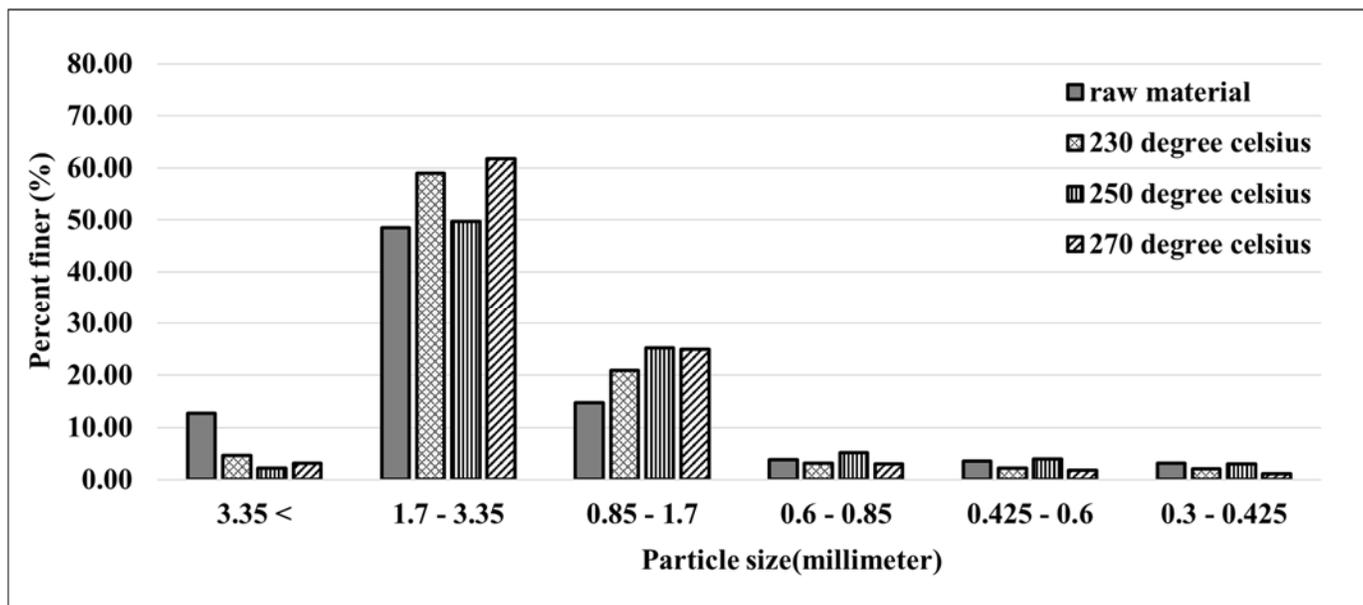


รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคขังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

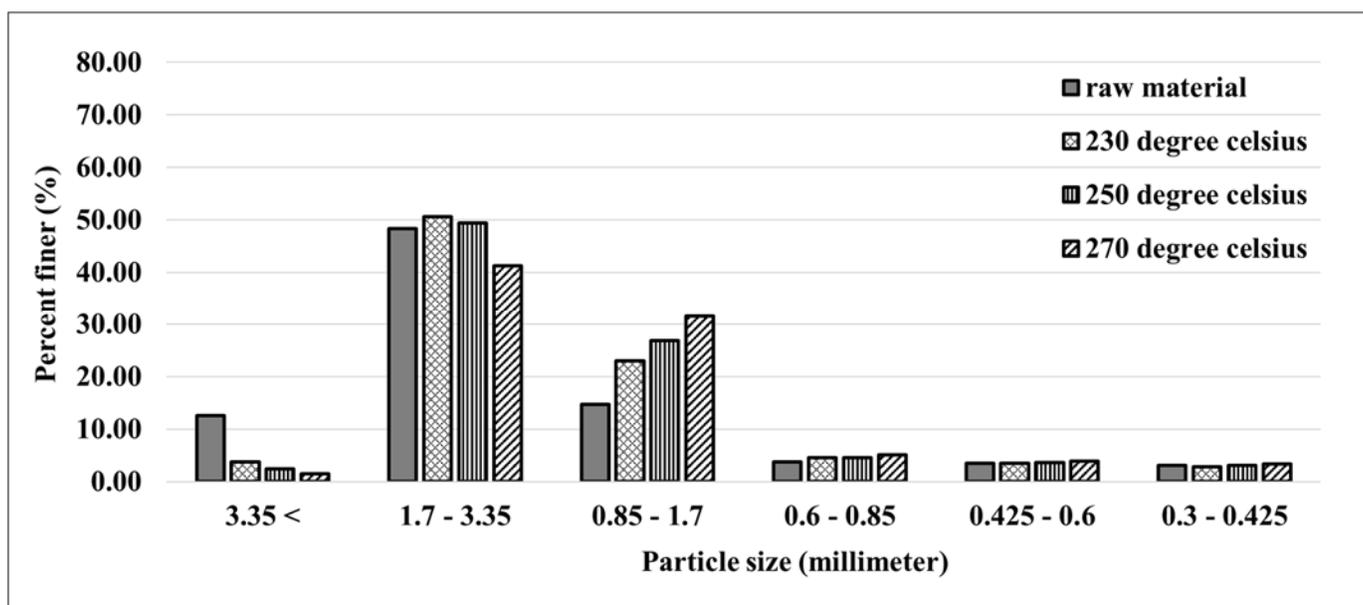
4.6.3. กะลาปาล์ม

4.6.3.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที

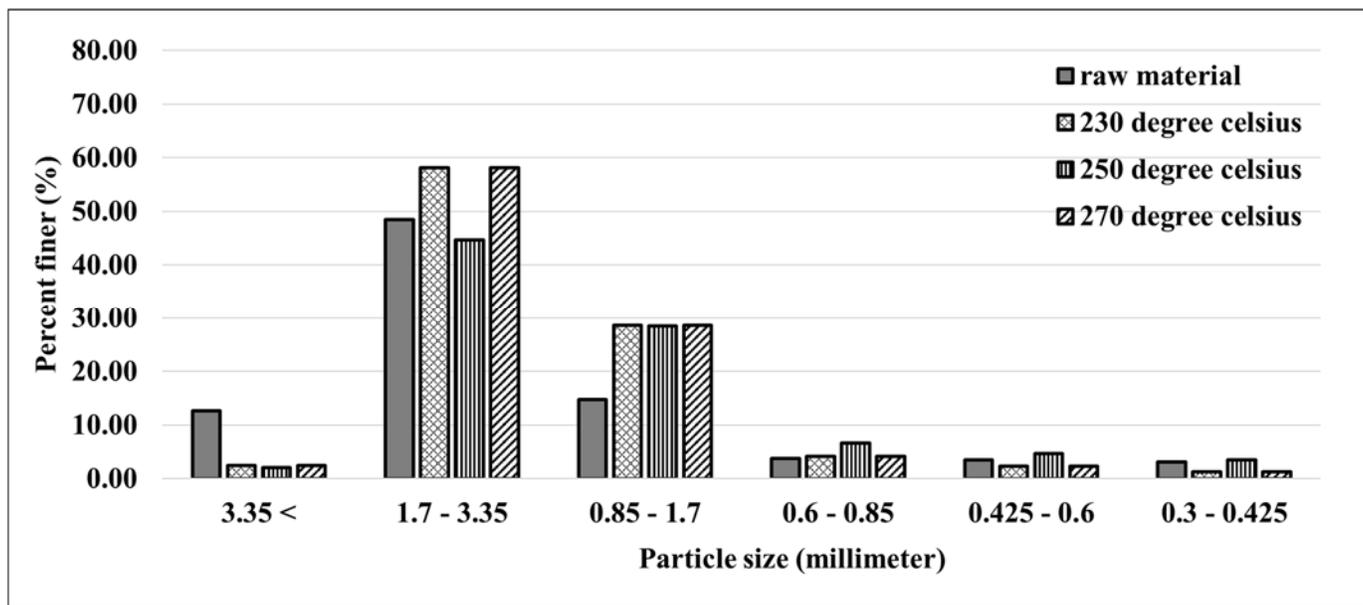
รูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลขังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของชีวมวลดิบกะลาปาล์ม โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคชีวมวลทอริไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอริแฟคชันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของชีวมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 0.85 - 1.7 มิลลิเมตรจะพบว่าชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



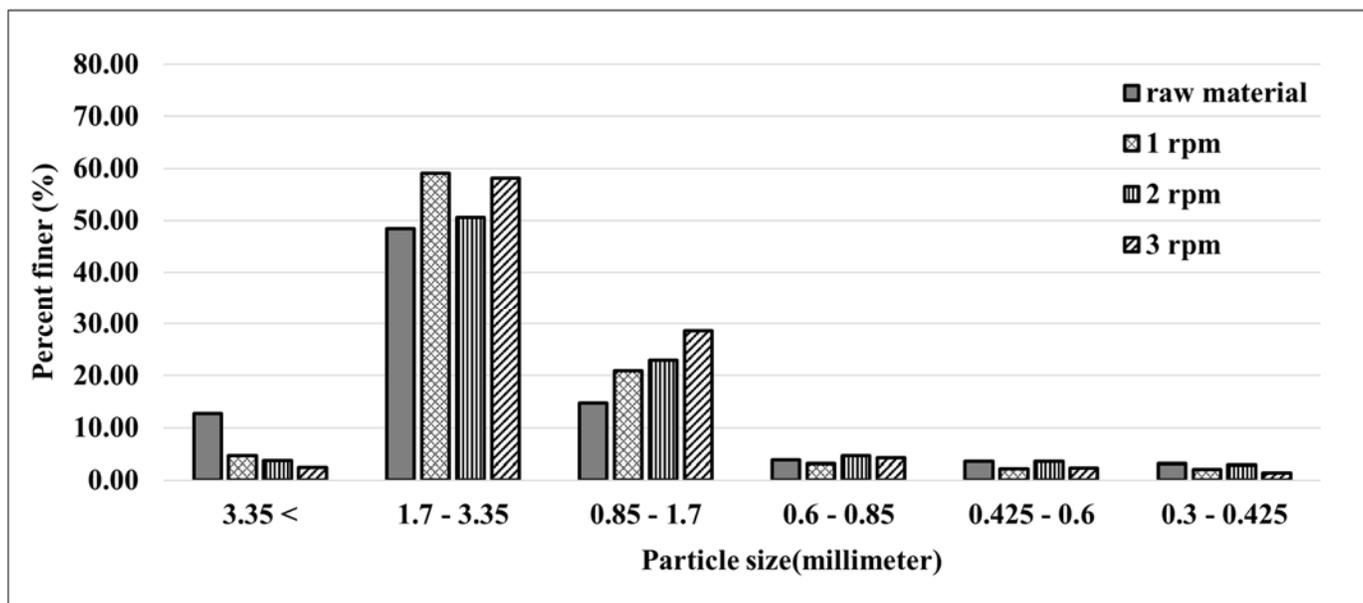
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที



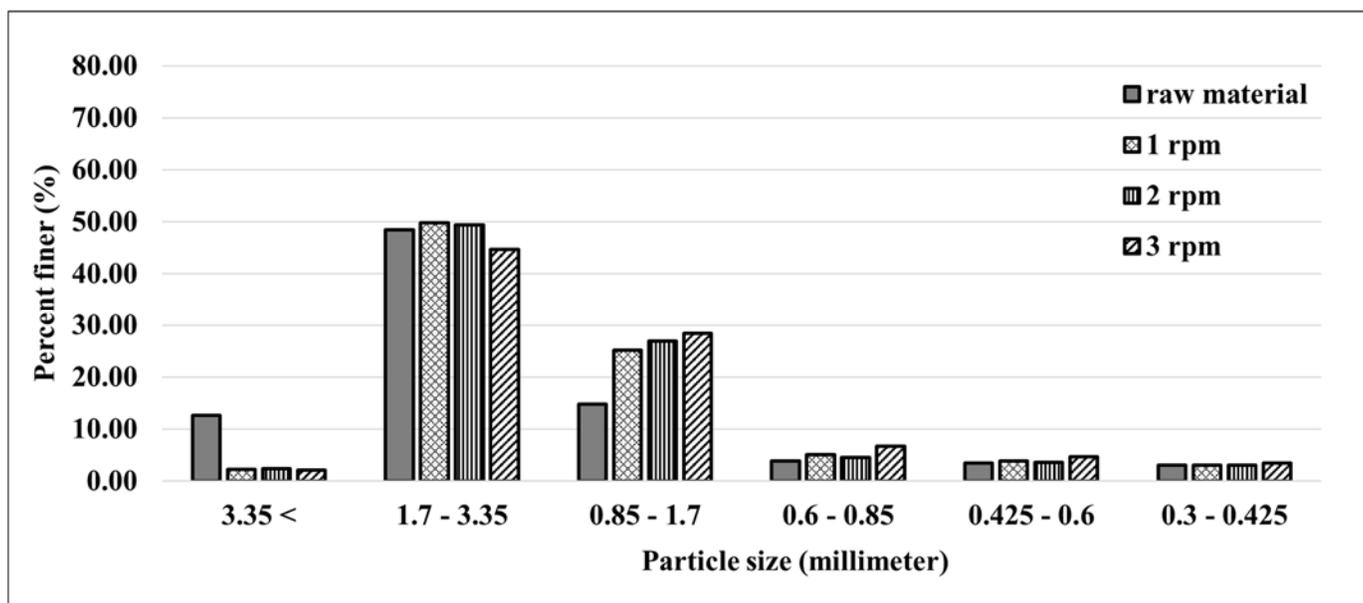
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.6.3.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส

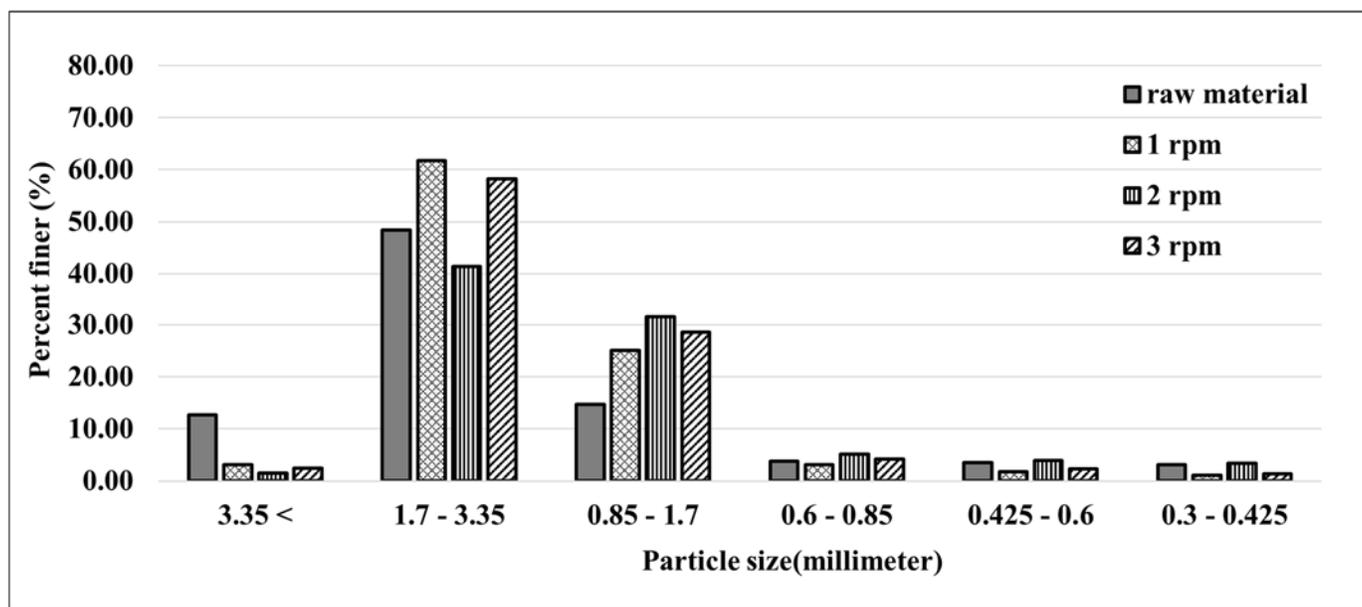
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของชีวมวลดิบนั้นจะแสดงอยู่ดังรูปที่ 4.28, 4.29 และ 4.30 โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคซึ่งข้าวโพดทอริไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง ส่งผลให้ชีวมวลได้รับความร้อนนานขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้นานขึ้นทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 0.85 - 1.7 มิลลิเมตรจะพบว่า ชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.30 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

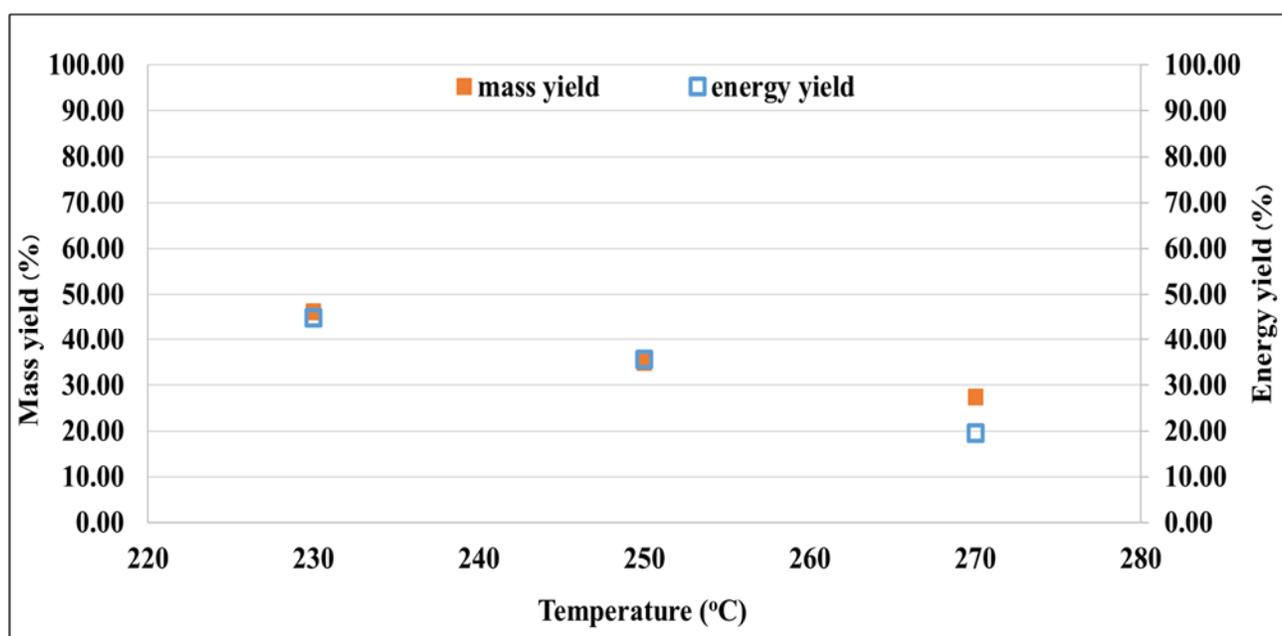
จากการทดลองสรุปได้ว่าอุณหภูมิและความเร็วรอบนั้นในการหมุนเตาเผาที่มีผลต่อค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น โดยในกระบวนการทอริไฟซ์นั้น เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์อนุภาคของชีวมวลขนาดใหญ่มีค่าลดลง และเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการสลายตัวของชีวมวลด้วยในระหว่างกระบวนการทอริไฟซ์ทำให้ เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส เกิดการสลายตัว และทำให้ปริมาณความชื้นภายในชีวมวลลดลง ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของชีวมวลมีขนาดเล็กลง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการยิ่งสูง การสลายตัวของอนุภาคจะยิ่งสูงตามไปด้วยทำให้อนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเร็วรอบในการหมุนเตาที่ลดลงนั้นส่งผลให้ชีวมวลที่อยู่ในเตาเผาแบบหมุนนั้นได้รับความร้อนเป็นเวลานานมากยิ่งขึ้น ทำให้เวลาที่เกิดปฏิกิริยานั้นมากขึ้นตามไปด้วย

4.7 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

4.7.1 แกลบ

4.7.1.1 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

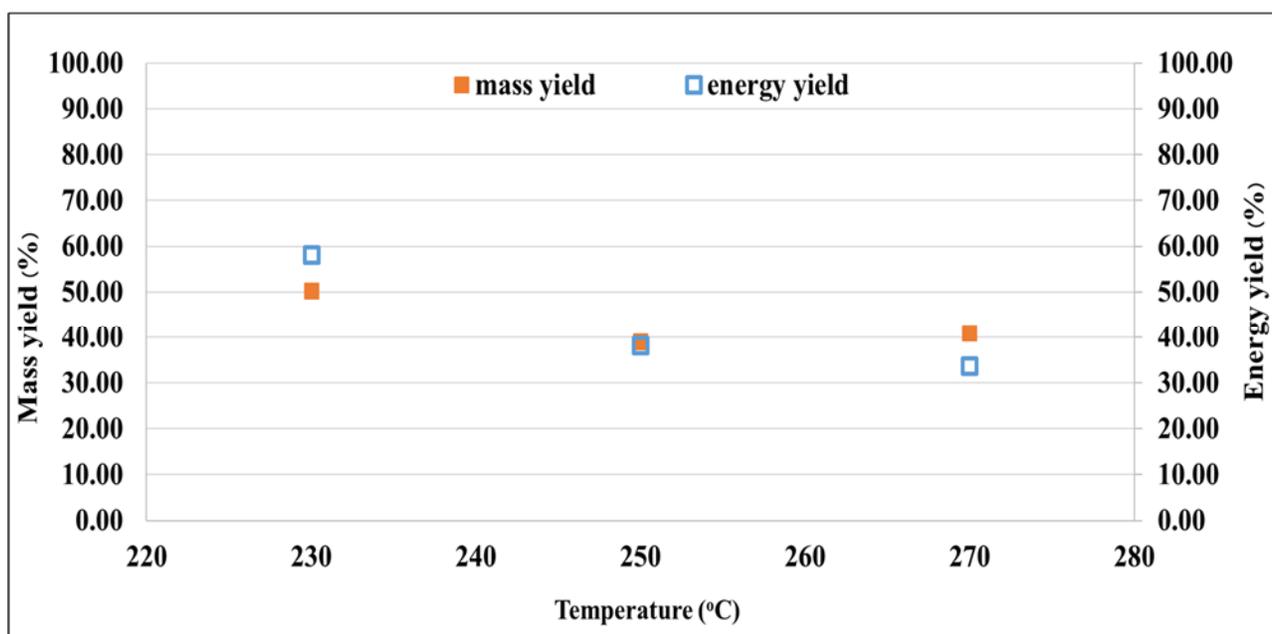
รูปที่ 4.31 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริไฟร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่แกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.78 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 39.63 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 27.58 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 44.96 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 35.78 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 19.66 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าผลได้เชิงพลังงานที่ลดลงนั้นเป็นผลเนื่องมาจากผลได้เชิงมวลที่ลดลง และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ลดลง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นทำให้อุณหภูมิของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริไฟร์เพิ่มขึ้นมีขนาดลดลงอย่างมากส่งผลให้ค่าความร้อนของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงและเนื่องด้วยแกลบนั้นมีปริมาณของซี้เถ้าเป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.31 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

4.7.1.2 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

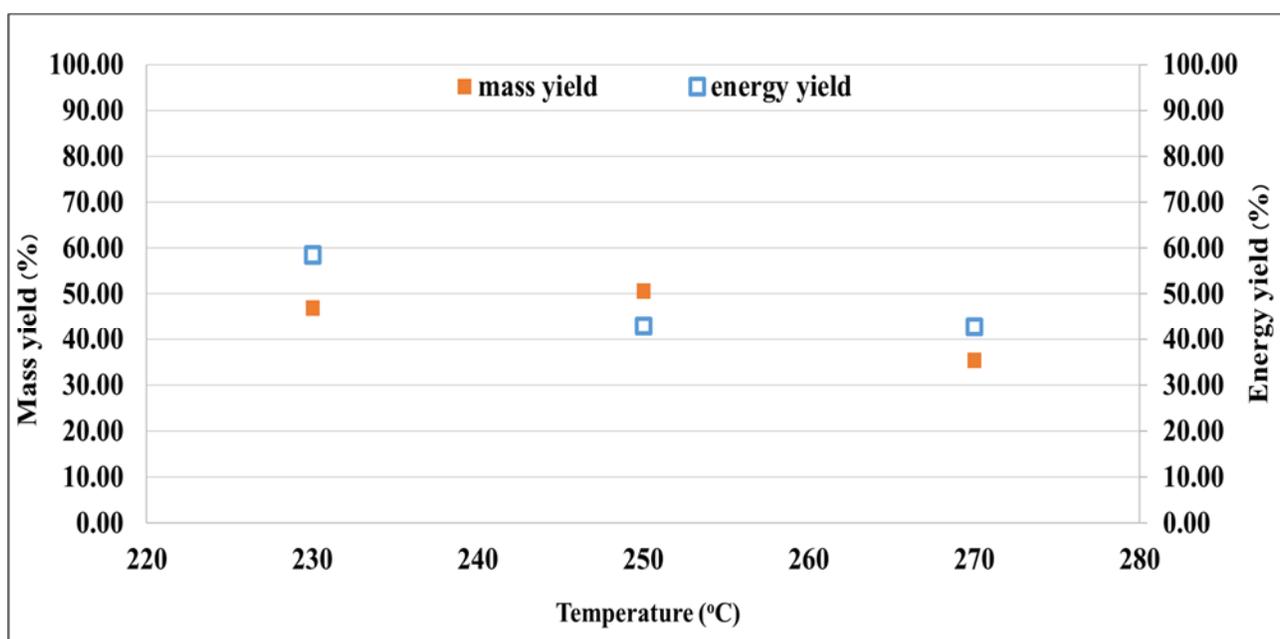
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.32 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่แกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 50.30 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 39.40 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.41 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 58.23 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 38.29 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 33.66 เปอร์เซ็นต์ และจะเห็นว่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้น มีแนวโน้มที่เหมือนกับแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.32 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

4.7.1.3 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

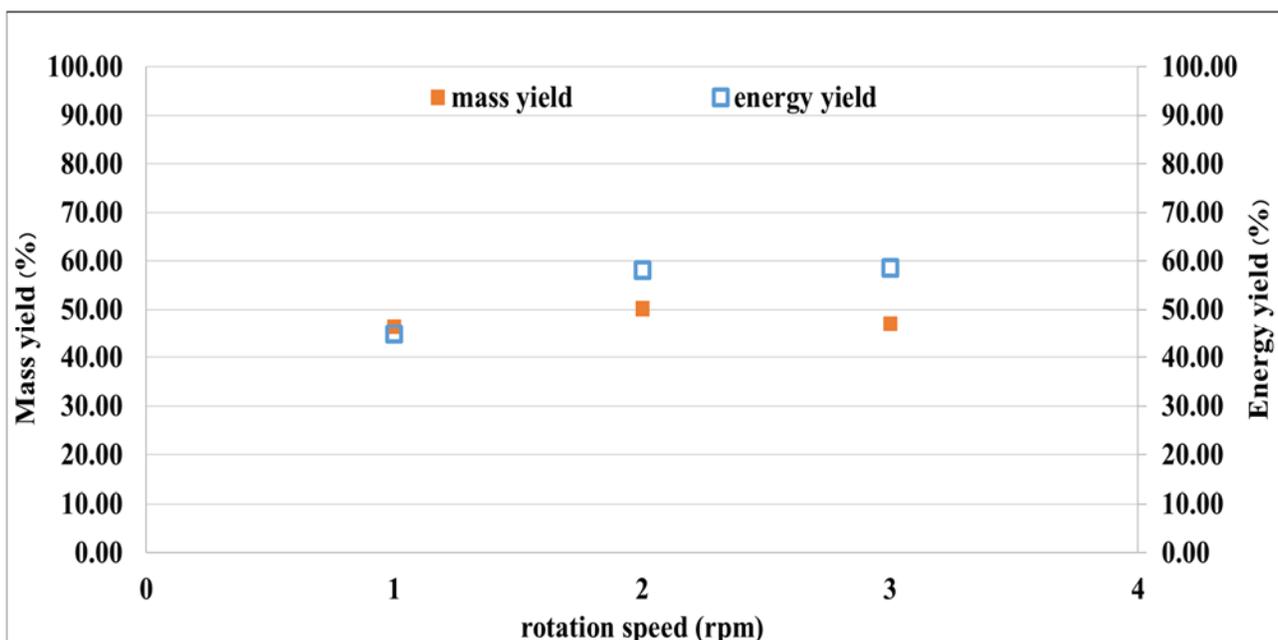
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.33 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่แกลบทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 54.22 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 43.78 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 41.55 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 58.67 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 43.02 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 42.90 เปอร์เซ็นต์ และจะเห็นว่าแนวโน้มของผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีจะคล้ายกับของความเร็วรอบ 1 และ 2 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.33 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.71.4 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

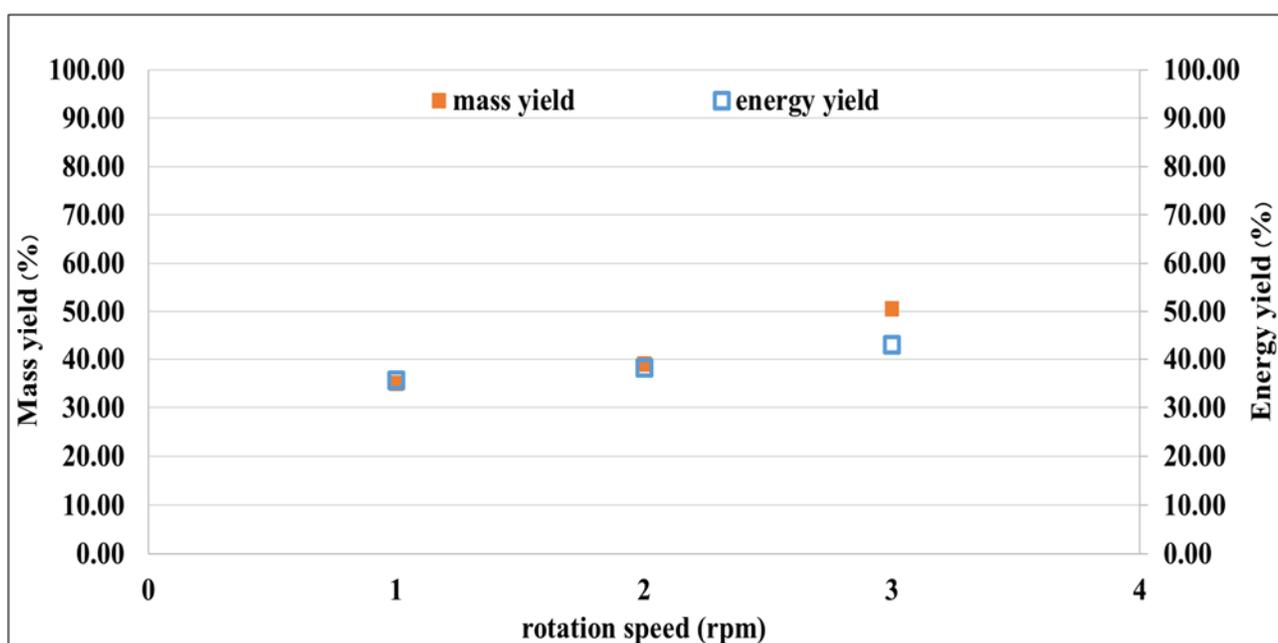
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.34 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้น ลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้น ลดลงจะส่งผลให้แกลบที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็ว รอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้น มีค่าลดลง โดยแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.78 เปอร์เซ็นต์ที่ ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 50.30 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที นั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 54.22 เปอร์เซ็นต์และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบ ต่อนาทีที่มีค่าเท่ากับ 44.96 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีที่มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.23 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีที่มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.67 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.34 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

4.7.1.5 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

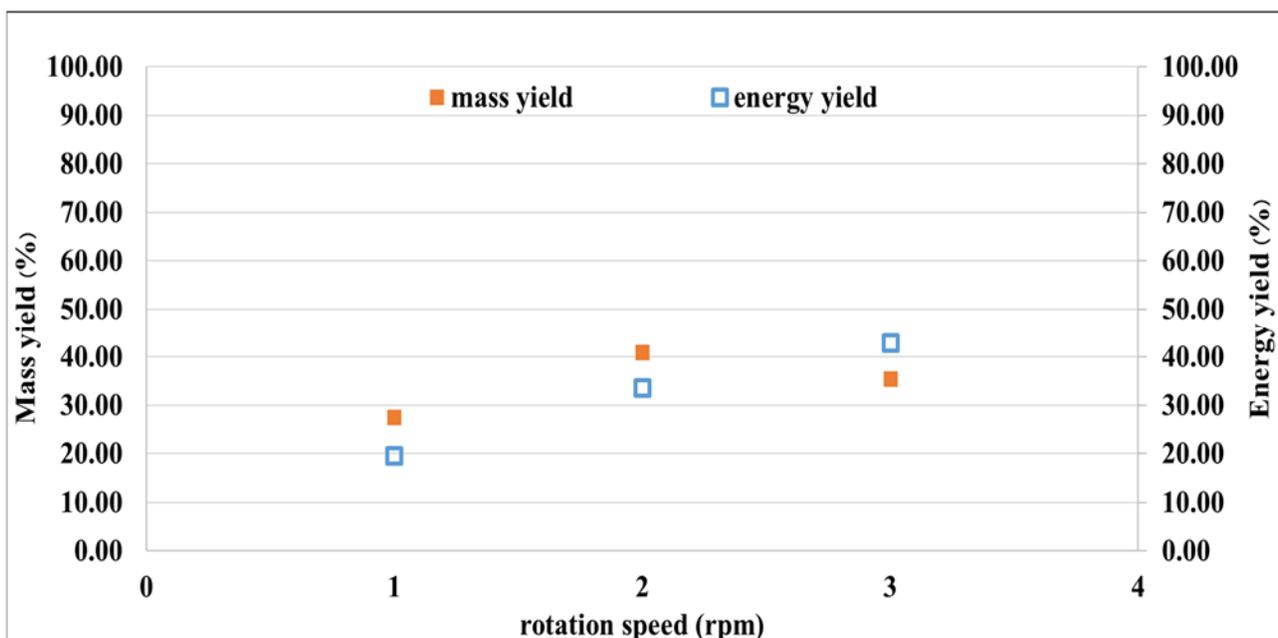
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.35 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้น ลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้น ลดลงจะส่งผลให้แกลบที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็ว รอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้น มีค่าลดลง โดยแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 39.63 เปอร์เซ็นต์ ที่ ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 39.40 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที นั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 43.78 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบ ต่อนาทีที่มีค่าเท่ากับ 35.76 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีที่มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 38.29 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีที่มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 43.02 เปอร์เซ็นต์



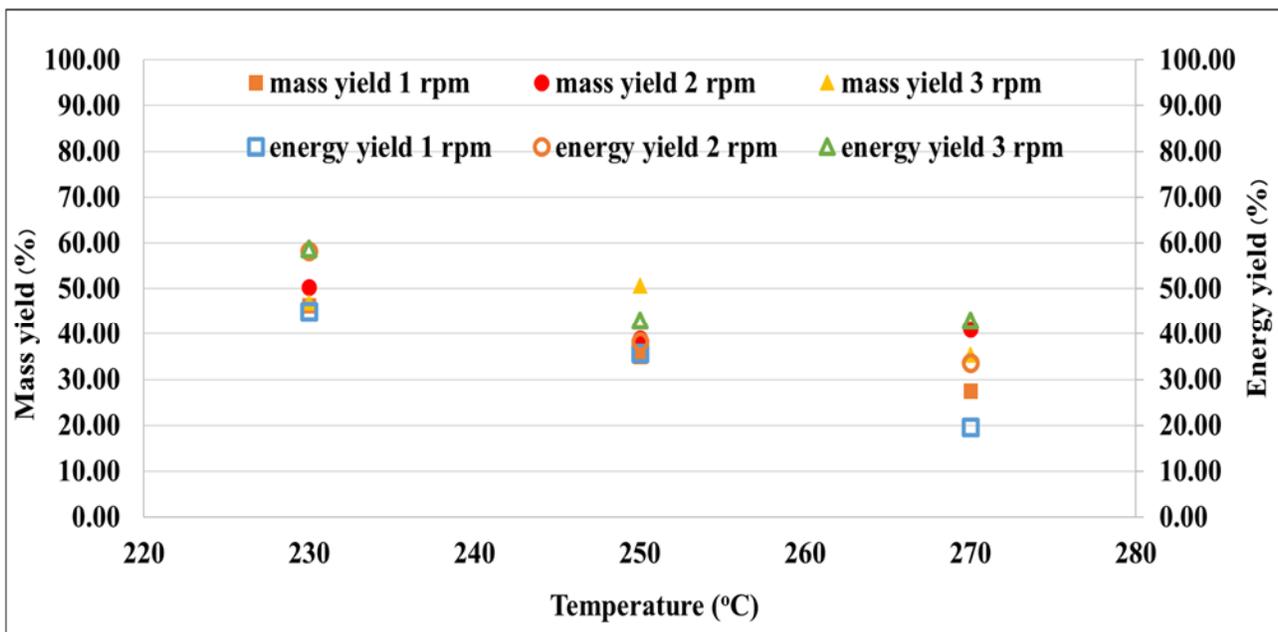
รูปที่ 4.35 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

4.7.1.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

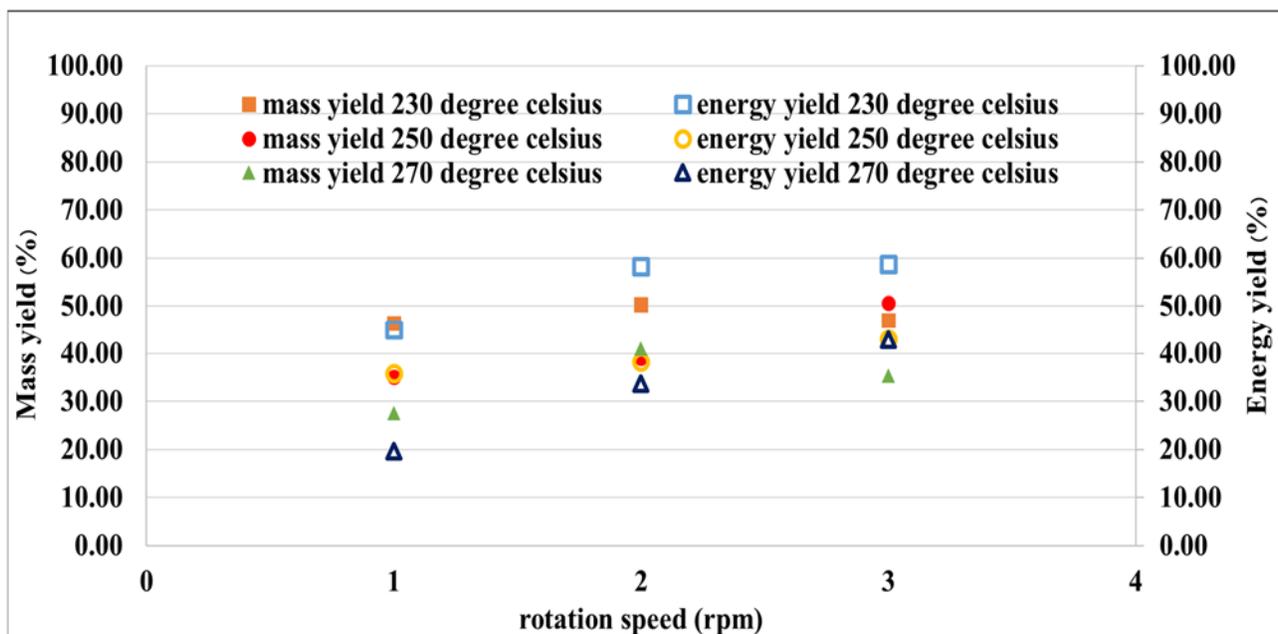
รูปที่ 4.36 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาที่ลดลงจะส่งผลให้แกลบที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 39.63 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 39.40 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 43.78 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 35.76 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 38.29 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 43.02 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.36 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.37 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที

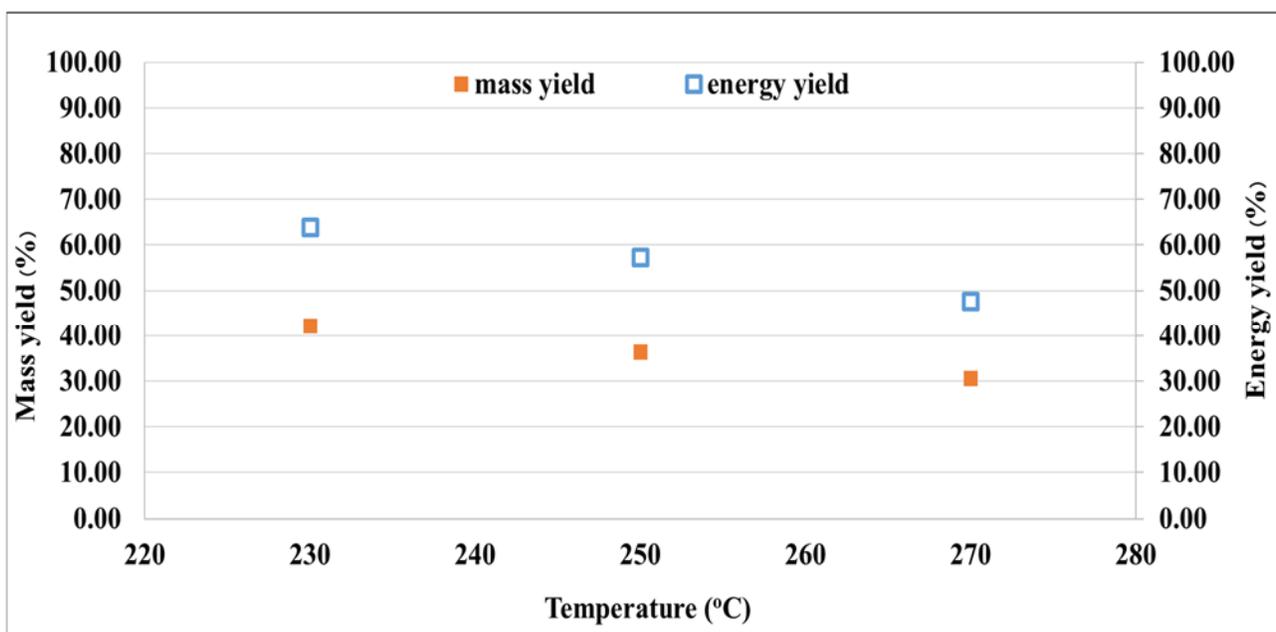


รูปที่ 4.38 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส

4.7.2. ชั่งข้าวโพด

4.7.2.1 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

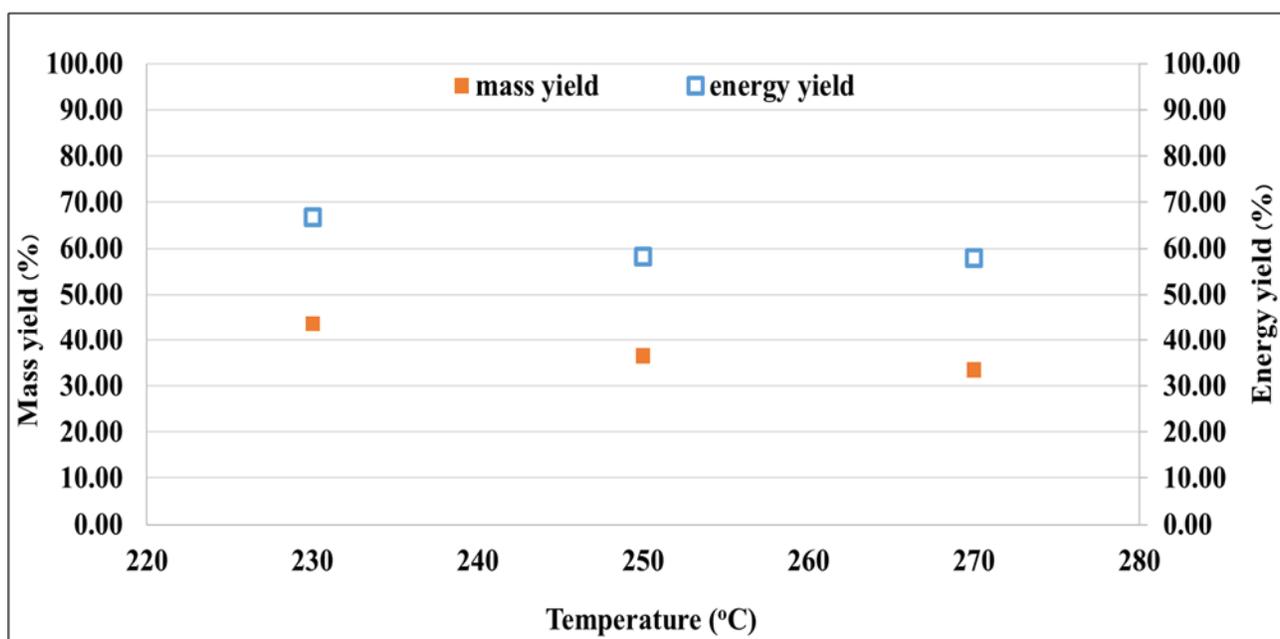
รูปที่ 4.39 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริไฟร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงเนื่องมาจากการสลายตัวในระหว่างกระบวนการทอริไฟร์เพิ่มขึ้น โดยชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 42.20 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.48 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 30.60 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 63.90 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 57.37 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 47.76 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าผลได้เชิงพลังงานที่มีแนวโน้มลดลงนั้นเป็นผลเนื่องมาจากผลได้เชิงมวลที่ลดลง โดยจากกราฟจะเห็นว่า ผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่ามากกว่าค่าผลได้เชิงมวลของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์เป็นผลเนื่องมาจากค่าความร้อนของชั่งข้าวโพดหลังทอริไฟร์นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความร้อนของชั่งข้าวโพดก่อนทอริไฟร์



รูปที่ 4.39 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

4.7.2.2 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

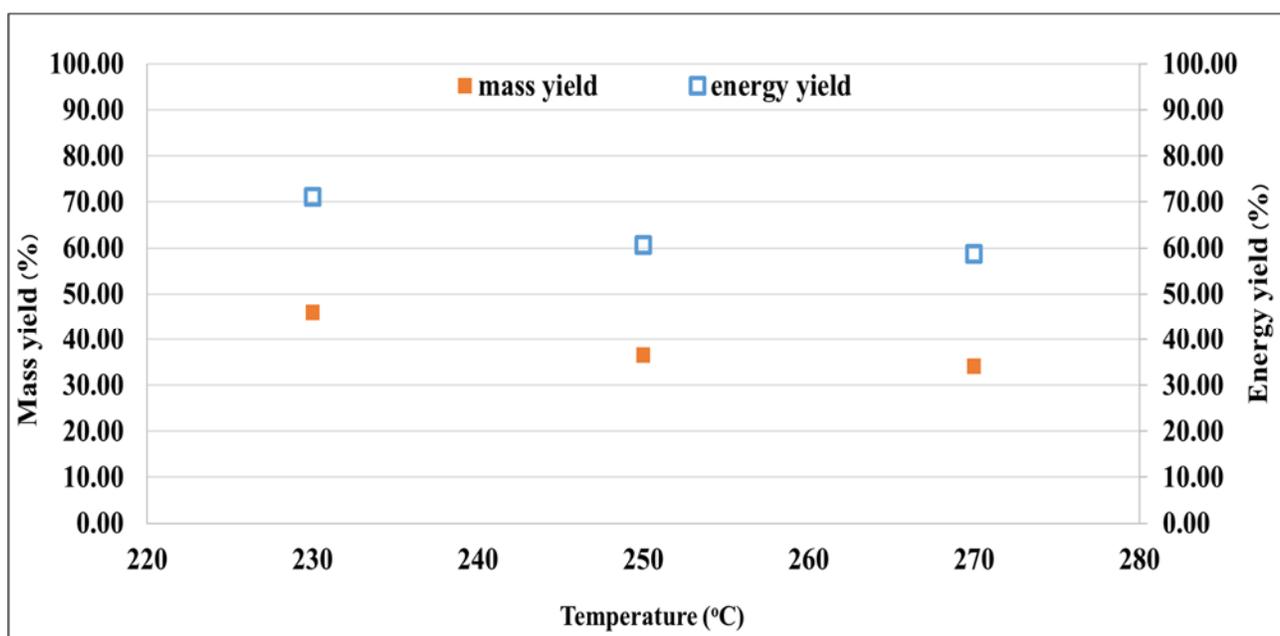
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงดังในรูปที่ 4.40 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่ซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 43.63 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.67 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 33.50 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 66.91 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.34 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 57.98 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.40 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

4.7.2.3 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

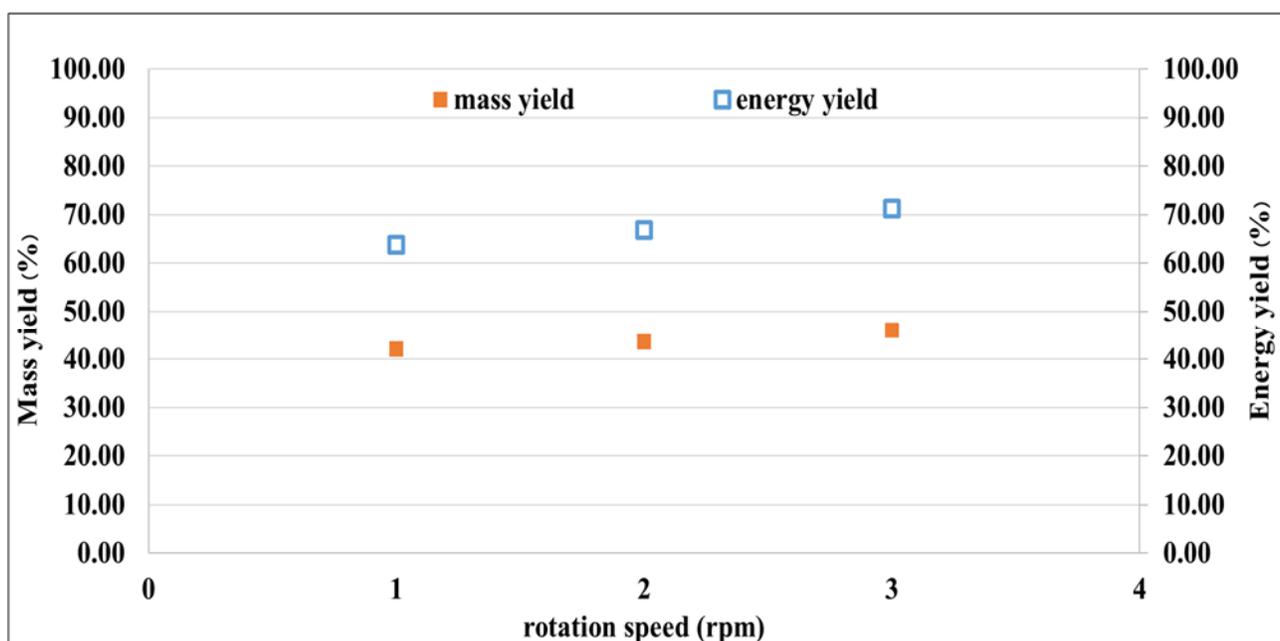
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงดังในรูปที่ 4.41 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟกชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่ซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.69 เปอร์เซ็นต์ และที่ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 34.18 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 71.27 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 60.75 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.41 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.7.2.4 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

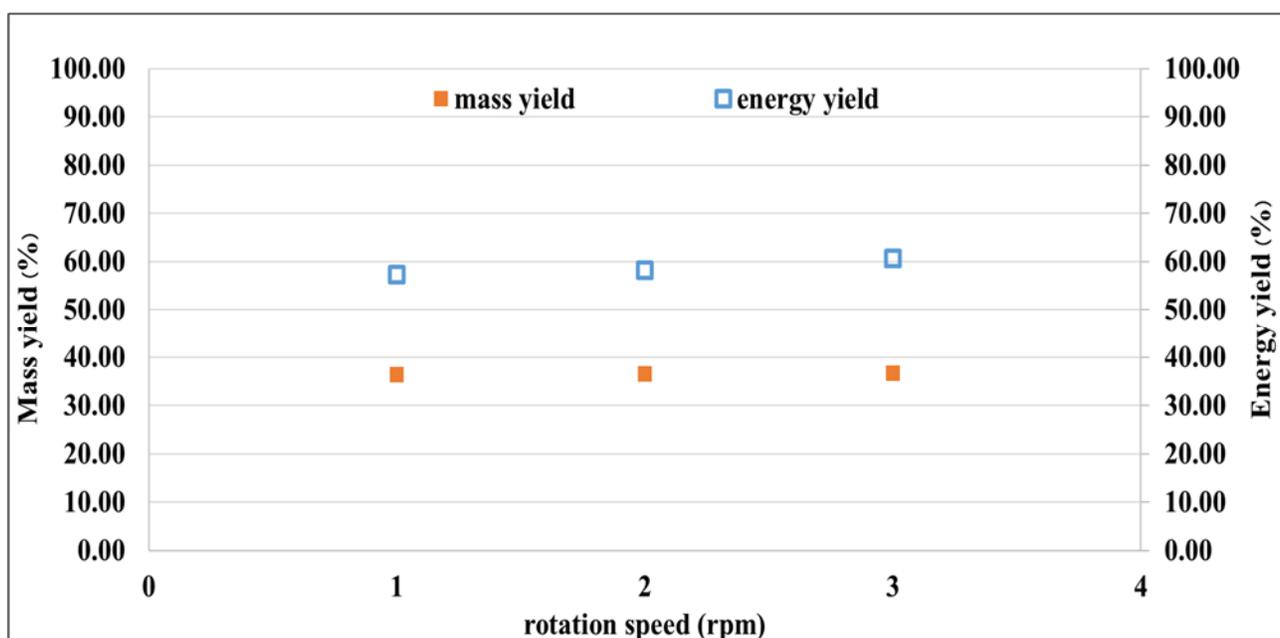
รูปที่ 4.42 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ซังข้าวโพดที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 42.40 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 43.63 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.08 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 63.90 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 66.91 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 71.27 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.42 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

4.7.2.5 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

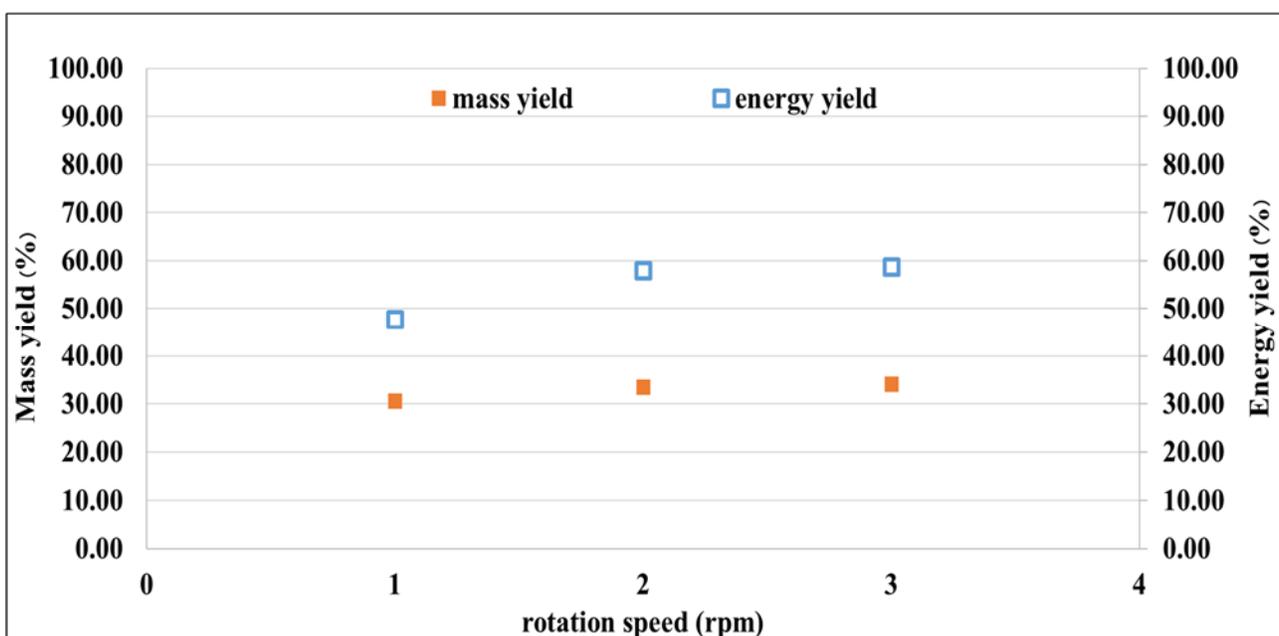
รูปที่ 4.43 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ซังข้าวโพดที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.48 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.67 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.69 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 57.37 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.34 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 60.75 เปอร์เซ็นต์



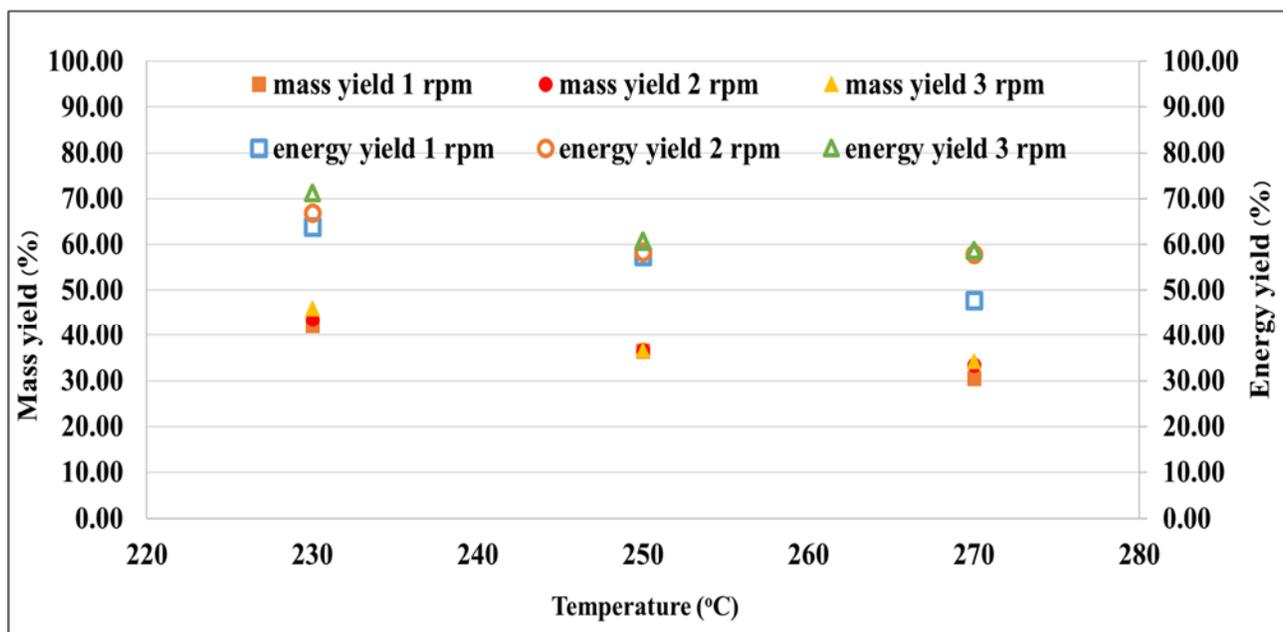
รูปที่ 4.43 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

4.7.2.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

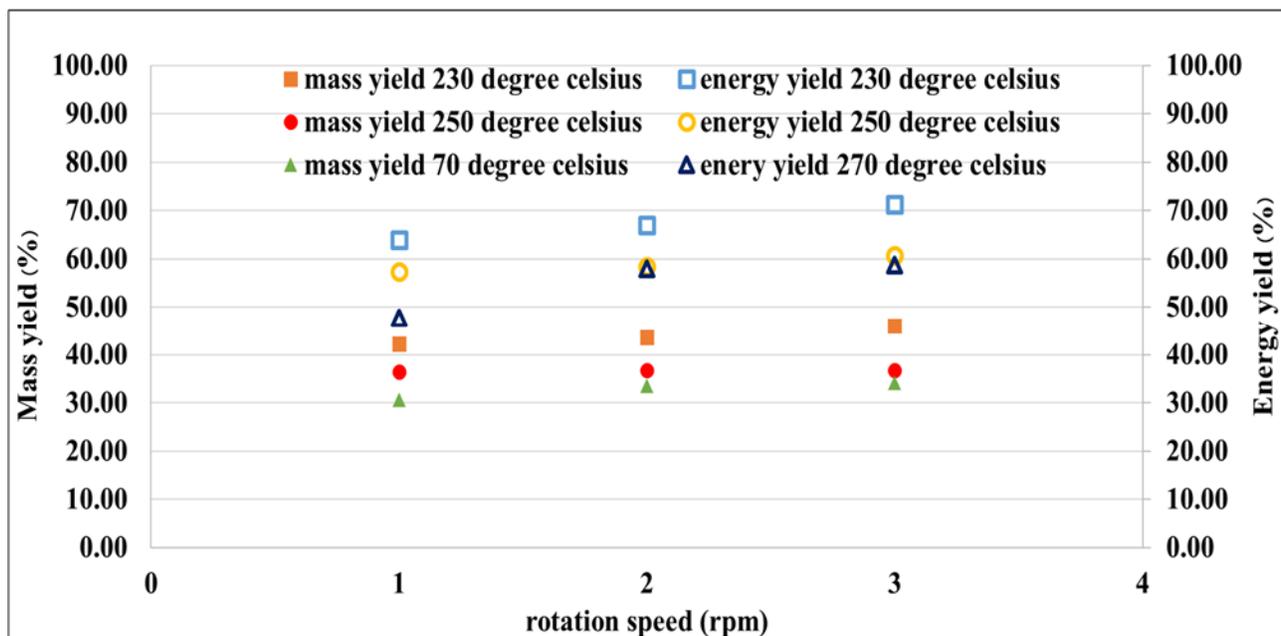
รูปที่ 4.44 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ซังข้าวโพดที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 30.60 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 33.50 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 34.18 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 47.76 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 57.98 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.44 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.45 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที

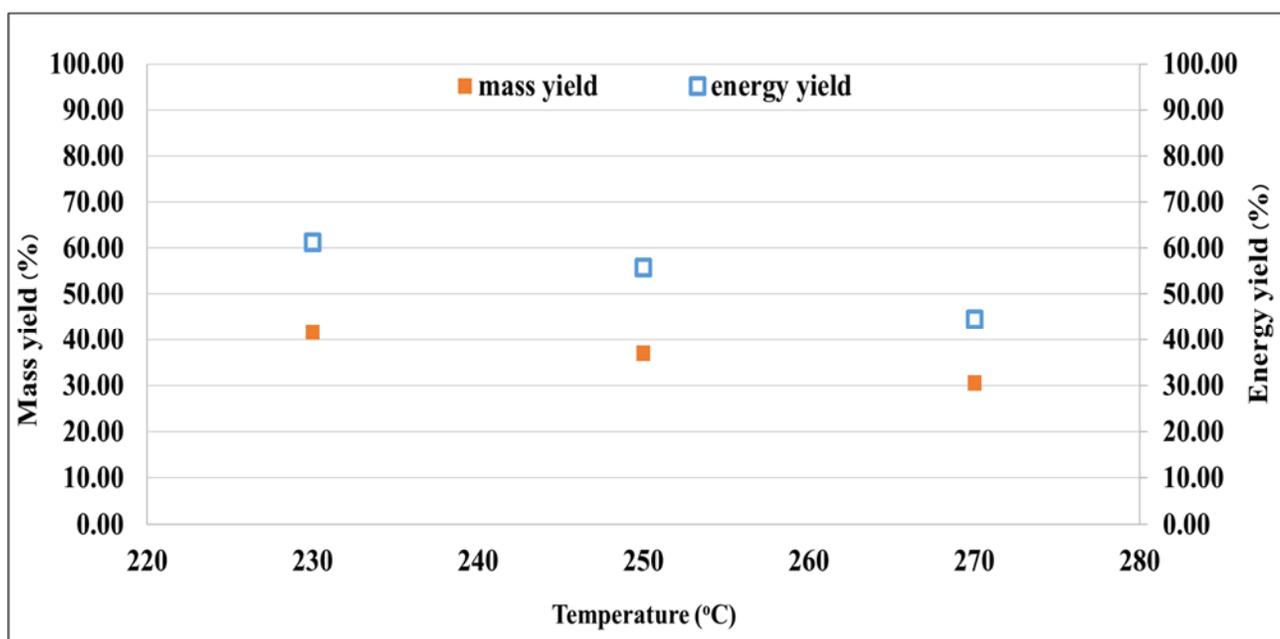


รูปที่ 4.46 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส

4.7.3 กะลาปาล์ม

4.7.3.1 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

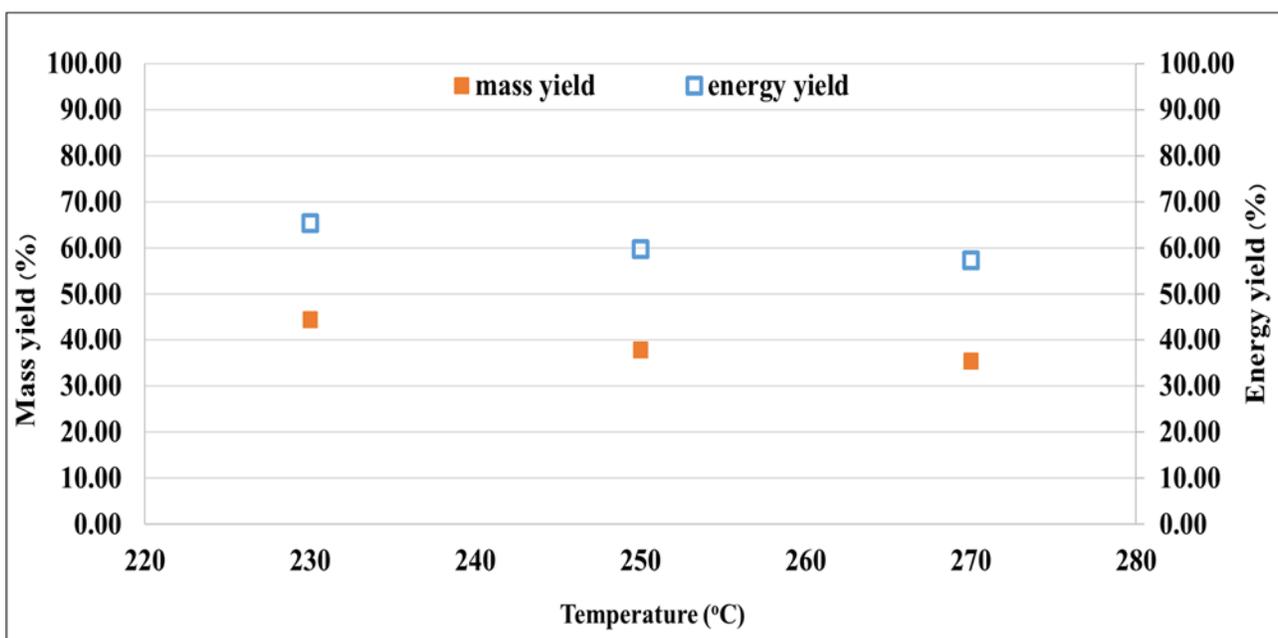
รูปที่ 4.47 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริไฟร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงเนื่องมาจากการสลายตัวในระหว่างกระบวนการทอริไฟร์เพิ่มขึ้น โดยกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 41.76 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.98 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 30.58 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 61.27 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 55.82 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 44.64 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าผลได้เชิงพลังงานที่มีแนวโน้มลดลงนั้นเป็นผลเนื่องมาจากผลได้เชิงมวลที่ลดลง โดยจากกราฟจะเห็นว่า ผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่ามากกว่าค่าผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์เป็นผลเนื่องมาจากค่าความร้อนของกะลาปาล์มหลังทอริไฟร์นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความร้อนของกะลาปาล์มก่อนทอริไฟร์



รูปที่ 4.47 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

4.7.3.2 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

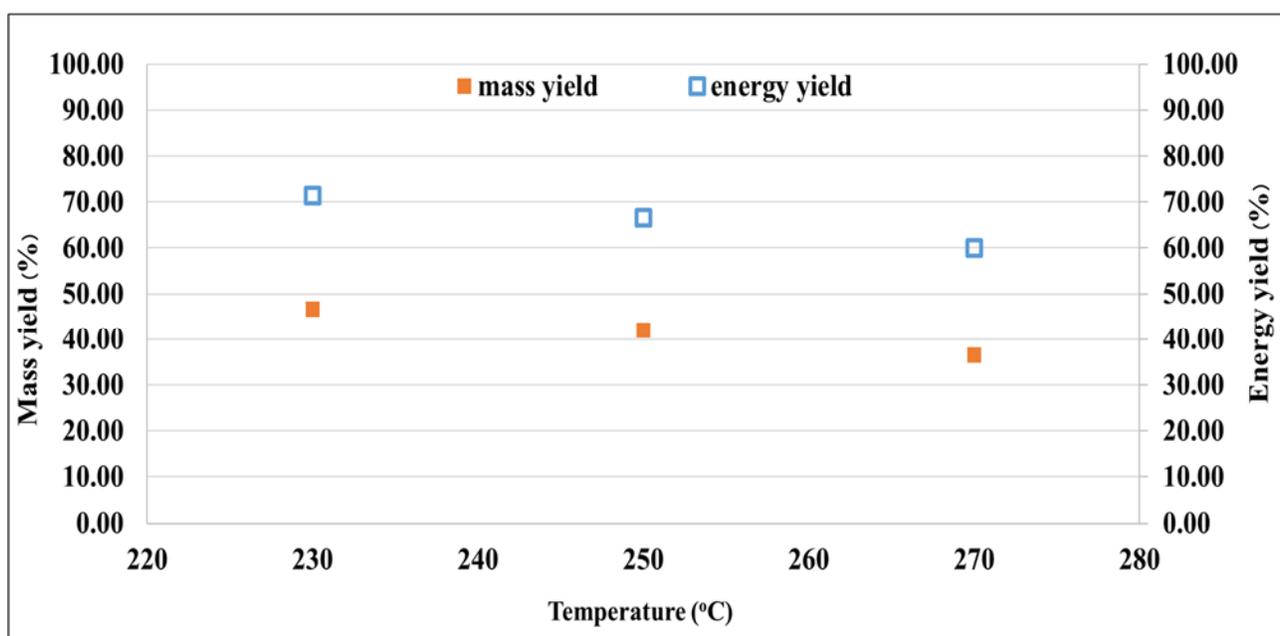
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงดังในรูปที่ 4.48 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่กะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 44.60 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 37.90 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 35.48 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 65.45 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 59.90 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 57.51 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.48 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

4.7.3.3 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

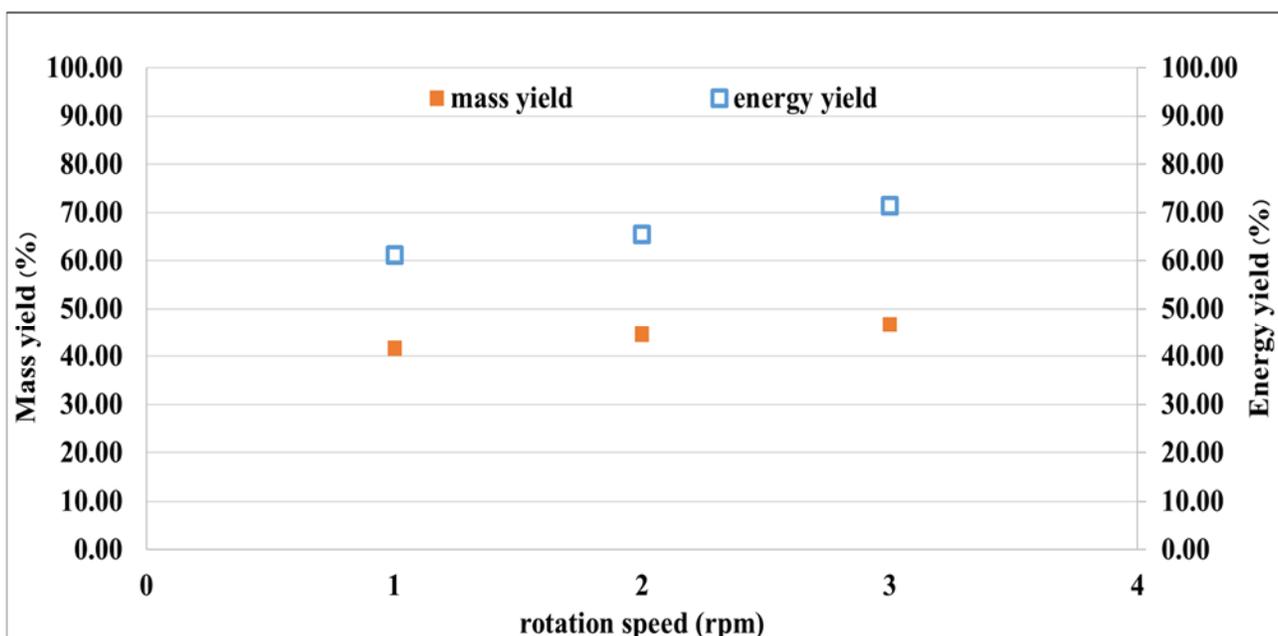
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงดังในรูปที่ 4.49 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่กะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.72 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 42.11 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.57 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 71.51 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 66.72 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 60.10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.49 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.7.3.4 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

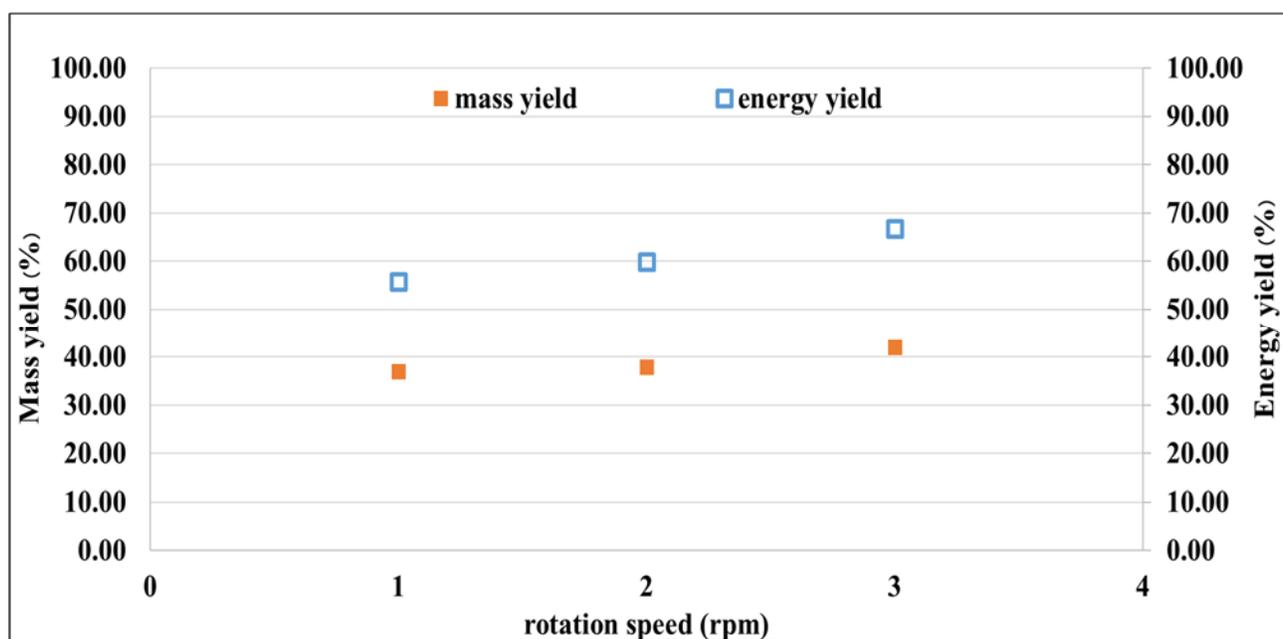
รูปที่ 4.50 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผานั้นลดลงจะส่งผลให้กะลาปาล์มที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยกะลาปาล์มที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 41.76 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 44.60 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.72 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 61.27 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 65.45 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 71.51 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.50 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

4.7.3.5 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

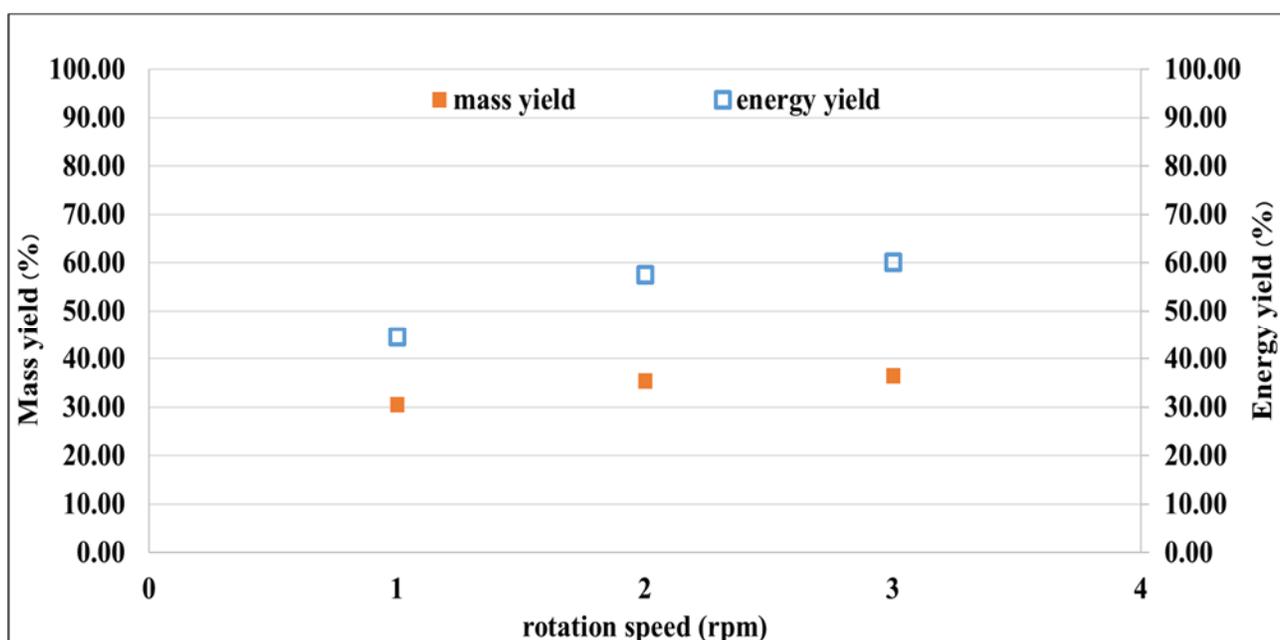
รูปที่ 51 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผานั้นลดลงจะส่งผลให้กะลาปาล์มที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยกะลาปาล์มที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.98 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 37.90 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 42.11 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 55.82 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 59.90 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 66.72 เปอร์เซ็นต์



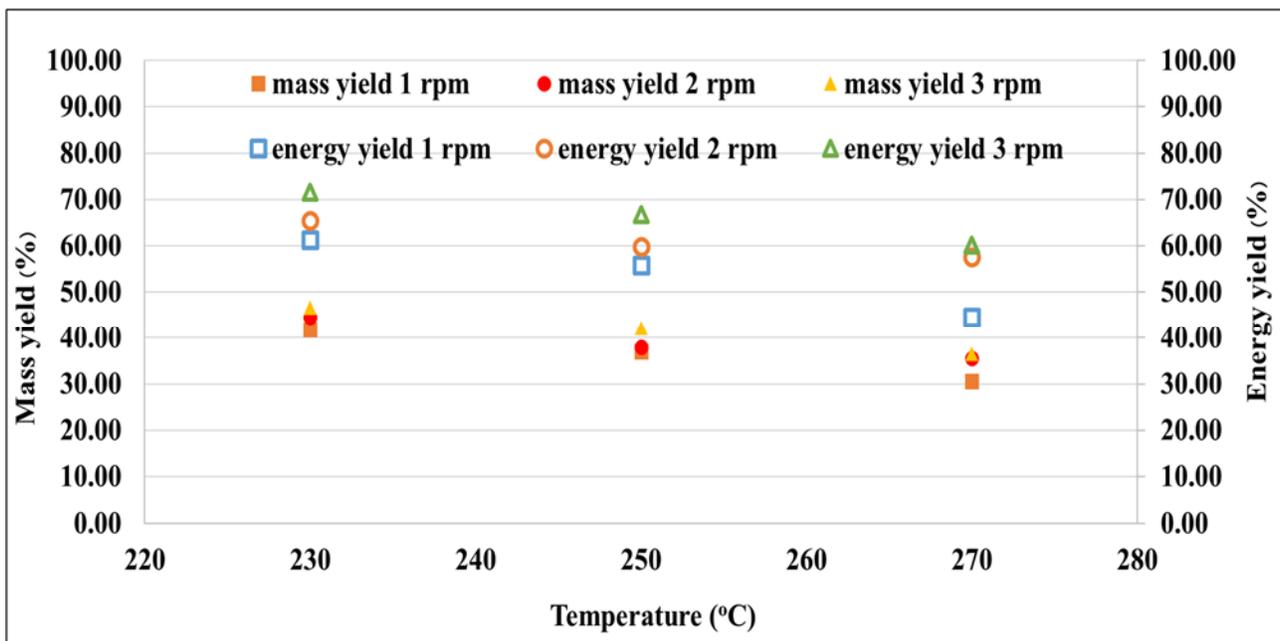
รูปที่ 4.51 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

4.7.3.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

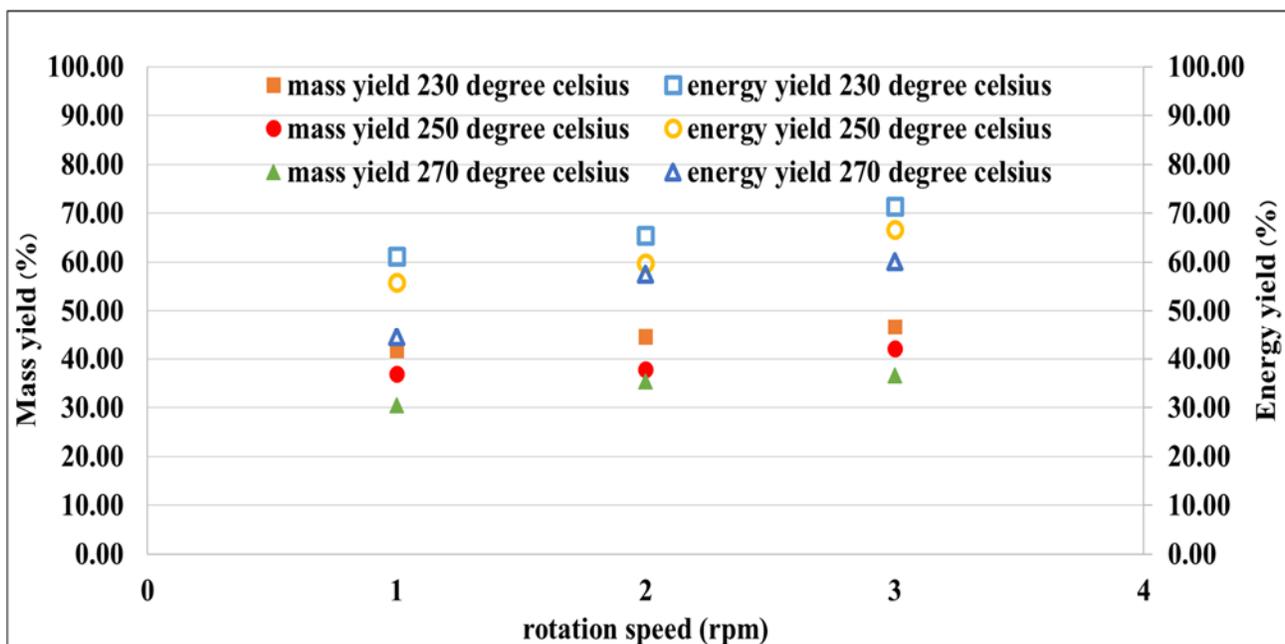
รูปที่ 4.52 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา นั้นลดลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผานั้นลดลงจะส่งผลให้กะลาปาล์มที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของกะลาปาล์มทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยกะลาปาล์มที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 30.58 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 35.48 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.57 เปอร์เซ็นต์ และผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 44.64 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 57.51 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 60.10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.52 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.53 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.54 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความร้อนสูญเสียต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นส่งผลให้อุณหภูมิที่ผนังของเตาเผาแบบหมุน อุณหภูมิของแก๊สไอเสีย มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยค่าความร้อนสูญเสียที่มากที่สุดคือ ค่าความร้อนสูญเสียที่ผิวเตาเผาแบบหมุน ดังนั้นเมื่อนำพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาแบบหมุนจากเชื้อเพลิงอัดก้อนหักด้วยค่าความร้อนสูญเสียต่างๆของเตาเผาแบบหมุน จะได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งค่าความร้อนสูญเสียจากปล่องไอเสียจะถูกนับเป็นความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และจะพบว่าความเร็วรอบของการทดลองนั้นมีผลต่อค่าความร้อนสูญเสียที่น้อยมาก จะพบว่าค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชัน

การอบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อนด้วยแก๊สไอเสียนั้นพบว่าการใช้แก๊สไอเสียจากกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีอุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นใช้เวลาในการอบน้อยที่สุด เนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะช่วยให้สามารถระเหยความชื้นได้ดีซึ่งจะทำให้การอบแห้งทำได้เร็วกว่า

ต้นทุนของกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นพบว่าเมื่อความเร็วรอบของกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้กำลังการผลิตของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการนั้นลดลง โดยเปรียบเทียบจากจำนวนชั่วโมงต่อวันที่เท่ากันจะพบว่าที่ความเร็วรอบที่มากกว่านั้นจะมีปริมาณของชีวมวลจากการผลิตต่อชั่วโมงที่มากกว่า เมื่อคิดเป็นปริมาณต่อวันทำให้ที่ความเร็วรอบ 3 มากกว่าที่ 1 และ 2 รอบต่อนาที และเมื่อเปรียบเทียบจากชนิดของชีวมวลจะเห็นว่าชีวมวลแต่ละชนิดนั้นจะมีกำลังการผลิตที่ไม่เท่ากันในแต่ละความเร็วรอบ ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในหน่วย บาท/กิโลกรัม จะพบว่า ที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายต่อวันเท่ากันนั้น นำมาเปรียบเทียบในหน่วย บาท/กิโลกรัม ส่งผลให้ที่ความเร็วรอบที่มากกว่านั้นมีค่าใช้จ่ายที่ลดลง คือ ค่าแรงงาน ค่ามวลอัดก้อน และค่าไฟฟ้า มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบที่ต่ำ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วรอบของกระบวนการนั้นมีผลต่อต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมากโดยความเร็วรอบยิ่งสูงจะส่งผลให้กำลังการผลิตสูงขึ้นตามและต้นทุนลดลงตามไปด้วย

ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีผลมาจากอุณหภูมิและความเร็วรอบนั้นในการหมุนเตาเผา เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์อนุภาคของชีวมวลขนาดใหญ่มีค่าลดลง และเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการสลายตัวของชีวมวลด้วยในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชัน ทำให้ เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส เกิดการสลายตัว และทำให้ปริมาณความชื้นภายในชีวมวลลดลง ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของชีวมวลมีขนาดเล็กลง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการยิ่งสูง การสลายตัวของอนุภาคจะยิ่งสูงตามไปด้วย ทำให้อนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเร็วรอบในการหมุนเตาที่ลดลงนั้นส่งผลให้ชีวมวลที่อยู่ในเตาเผาแบบหมุนนั้นได้รับความร้อนเป็นเวลานานมากยิ่งขึ้น ทำให้เวลาที่เกิดปฏิกิริยานั้นมากขึ้นตามไปด้วย

ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานพบว่าอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลได้เชิงมวลลดลง เนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นนั้นทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบภายในชีวมวลที่มากขึ้นทำให้มวลสุดท้ายของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นลดลง เมื่อนำมาคำนวณหาค่าผลได้เชิงมวลจึงมีค่าลดลง และพบว่าเมื่อความเร็วรอบของกระบวนการเพิ่มมากขึ้นนั้น ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลของกระบวนการมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากชีวมวลนั้นจะได้รับความร้อนเป็นเวลาน้อยกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ ทำให้เกิดการสลายตัวของชีวมวลน้อยลงไปด้วย และพบว่าผลได้เชิงพลังงานนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าผลได้เชิงพลังงานนั้นมีค่าลดลงและที่ความเร็วรอบที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ผลได้เชิงพลังงานนั้นเพิ่มขึ้น โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 230 องศาเซลเซียส ความเร็ว 3 รอบต่อนาที

ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนนั้นคืออุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที เนื่องจากมีค่าความร้อนสูญเสียที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิอื่น ค่าความชื้นเฉลี่ยของชีวมวลหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ใช้ต้นทุนในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่น้อยกว่า มีค่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานที่มาก

ภาคผนวก

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเกลบที่ 230 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	0.07	0.00	0.07	0.30
1.7 - 3.35	2.71	9.38	7.34	37.80
0.85 - 1.7	18.03	34.15	36.80	54.66
0.6 - 0.85	34.51	33.26	30.67	3.77
0.425 - 0.6	28.54	16.77	15.01	0.89
0.3 - 0.425	9.53	3.71	5.46	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเกลบที่ 250 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	0.03	0.00	0.10	0.30
1.7 - 3.35	1.28	1.61	3.57	37.80
0.85 - 1.7	11.21	13.02	18.72	54.66
0.6 - 0.85	26.49	30.32	36.63	3.77
0.425 - 0.6	31.12	26.63	27.93	0.89
0.3 - 0.425	18.78	17.34	8.28	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเกลบที่ 270 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	0.10	0.20	0.13	0.30
1.7 - 3.35	1.06	2.58	2.96	37.80
0.85 - 1.7	6.77	13.17	17.69	54.66
0.6 - 0.85	14.62	26.94	36.50	3.77
0.425 - 0.6	22.23	31.55	27.25	0.89
0.3 - 0.425	26.07	16.97	8.92	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซังข้าวโพดที่ 230 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	68.86	47.90	59.78	0.30
1.7 - 3.35	28.27	44.86	34.74	37.80
0.85 - 1.7	1.21	4.71	1.57	54.66
0.6 - 0.85	0.30	0.71	0.29	3.77
0.425 - 0.6	0.25	0.46	2.25	0.89
0.3 - 0.425	0.15	0.25	0.10	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซึ่งข้าวโพดที่ 250 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	49.16	48.69	47.83	0.30
1.7 - 3.35	45.42	43.62	41.06	37.80
0.85 - 1.7	3.49	5.16	5.79	54.66
0.6 - 0.85	0.46	0.76	1.31	3.77
0.425 - 0.6	0.05	0.30	0.94	0.89
0.3 - 0.425	0.10	0.10	0.50	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซึ่งข้าวโพดที่ 270 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	44.36	42.49	45.30	0.30
1.7 - 3.35	44.70	46.53	45.90	37.80
0.85 - 1.7	6.48	6.86	5.97	54.66
0.6 - 0.85	1.16	1.27	0.81	3.77
0.425 - 0.6	0.96	0.74	0.30	0.89
0.3 - 0.425	0.51	0.44	0.10	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มที่ 230 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	4.61	3.73	0.30
1.7 - 3.35	48.45	59.07	50.62	37.80
0.85 - 1.7	14.74	20.94	23.00	54.66
0.6 - 0.85	3.81	3.15	4.63	3.77
0.425 - 0.6	3.51	2.22	3.48	0.89
0.3 - 0.425	3.11	2.02	2.86	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มที่ 250 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	2.20	2.39	0.30
1.7 - 3.35	48.45	49.78	49.45	37.80
0.85 - 1.7	14.74	25.16	26.92	54.66
0.6 - 0.85	3.81	5.10	4.54	3.77
0.425 - 0.6	3.51	3.88	3.65	0.89
0.3 - 0.425	3.11	3.06	3.05	0.69

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มที่ 270 องศาเซลเซียส

size	1 rpm	2rpm	3 rpm	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	3.12	1.53	0.30
1.7 - 3.35	48.45	61.69	41.32	37.80
0.85 - 1.7	14.74	25.01	31.48	54.66
0.6 - 0.85	3.81	3.04	5.08	3.77
0.425 - 0.6	3.51	1.75	3.85	0.89
0.3 - 0.425	3.11	1.12	3.32	0.69

ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์

rpm	อุณหภูมิ	mass yield	energy yield	energy yield average	sd	error
1	230	46.40	44.56	44.96	0.46	0.68
	230		45.47			
	230		44.86			
	250	35.10	36.21	35.78	0.39	0.63
	250		35.44			
	250		35.70			
	270	27.58	19.66	19.66	0.00	0.00
	270		19.66			
	270		19.66			
2	230	50.30	58.01	58.23	0.38	0.61
	230		58.67			
	230		58.01			
	250	39.00	37.27	38.29	0.92	0.96
	250		39.06			
	250		38.55			
	270	41.00	34.21	33.66	0.49	0.70
	270		33.27			
	270		33.50			
3	230	47.03	58.67	58.67	0.00	0.00
	230		58.67			
	230		58.67			
	250	50.67	43.97	43.02	1.00	1.00
	250		41.98			
	250		43.12			
	270	35.43	42.54	42.90	1.64	1.28
	270		41.46			
	270		44.69			

ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์

rpm	อุณหภูมิ	mass yield	energy yield	energy yield average	sd	error
1	230	42.20	63.56	63.90	1.82	1.35
	230		65.86			
	230		62.27			
	250	36.48	56.05	57.37	1.33	1.15
	250		57.37			
	250		58.70			
	270	30.60	47.01	47.76	1.62	1.27
	270		49.62			
	270		46.64			
2	230	43.63	67.83	66.91	1.31	2.29
	230		65.98			
	230		66.91			
	250	36.67	58.34	58.34	0.00	0.00
	250		58.34			
	250		58.34			
	270	33.50	57.98	57.98	1.15	1.07
	270		57.17			
	270		58.79			
3	230	46.08	71.64	71.27	0.43	0.65
	230		71.36			
	230		70.80			
	250	36.69	59.49	60.75	3.20	1.79
	250		64.39			
	250		58.38			
	270	34.18	59.16	58.75	0.59	0.77
	270		41.46			
	270		44.69			

ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของกะลาปาล์มทอริไฟร์

rpm	อุณหภูมิ	mass yield	energy yield	energy yield average	sd	error
1	230	41.76	59.99	61.27	1.11	1.05
	230		61.91			
	230		61.91			
	250	36.98	52.70	55.82	3.19	1.79
	250		55.68			
	250		59.08			
	270	30.58	43.41	44.64	1.23	1.11
	270		45.87			
	270		44.64			
2	230	44.60	64.85	65.45	2.74	1.66
	230		68.44			
	230		63.06			
	250	37.90	62.08	59.90	2.29	1.51
	250		60.12			
	250		57.50			
	270	35.48	57.51	57.51	0.82	0.90
	270		58.32			
	270		56.69			
3	230	46.72	74.91	71.51	3.81	1.95
	230		72.22			
	230		67.39			
	250	42.11	70.19	66.72	3.29	1.81
	250		66.31			
	250		63.65			
	270	36.57	60.10	60.10	0	0
	270		60.10			
	270		60.10			