



การปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุน



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

THE IMPROVEMENT OF BIOMASS PROPERTIES BY TORREFACTION ROTARY
KILN



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

58406203 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : กระบวนการทอรีแฟคชั่น, ชีวมวล, ผลได้เชิงพลังงาน, เตาเผาแบบหมุน

นาย ณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล: การปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น
ด้วยเตาเผาแบบหมุน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ธาราวดี

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอรีไฟร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้ชีวมวลทั้งหมด 2 ชนิด คือ ชังข้าวโพด และ แกลบ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่น และ ความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอรีไฟร์ เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ (ยาว 6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร) แก๊สปีโตเลียมเหลวถูกนำมาใช้ป้อนแหล่งให้ความร้อน การไหลภายในเตาเป็นแบบไหลสวนทางกันระหว่างชีวมวลและความร้อน ในสภาวะไร้ออกซิเจน มุมของเตาในการวิจัยคือ 2 องศา อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่ใช้คือ 230 ± 5 , 250 ± 5 และ 270 ± 5 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนเตาคือ 1, 2 และ 3 rpm ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิกายในเตาเผาแบบหมุน ค่าความชื้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานได้ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าชีวมวลหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าชีวมวลดิบ เมื่ออุณหภูมิการทอรีแฟคชั่นเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความชื้นก็จะลดลง ค่าผลได้เชิงมวลลดลง โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นคือที่ 3 รอบต่อนาทีและที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชีวมวลทอรีไฟร์มากที่สุด

58406203 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : torrefaction process, biomass, energy yield, rotary kiln

MR. NATTARAT CHUTWIBOONKUN : THE IMPROVEMENT OF BIOMASS PROPERTIES BY TORREFACTION ROTARY KILN THESIS ADVISOR : DOCTOR NATTAWUT THARAWADEE

This research studies the effect of torrefaction process by using a rotary kiln on torrefied biomass properties. 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 are investigated. The torrefaction rotary kiln (6 meters length and 0.3 meters diameter) is used in this research. The Liquid petroleum gas is used for the heat source. The internal flow inside the kiln counter current flow with the biomass and the heat in oxygen-free atmosphere. The inclination of kiln is around 2 degrees. The temperature of chamber is at 230 ± 5 , 250 ± 5 and 270 ± 5 °C. The rotation speed is at 1, 2 and 3 rpm. Temperature distribution, moisture content, particle distribution, Higher heating value, mass yield and energy yield were studied. In conclusion, the biomass properties after torrefaction process was better than raw material when the temperature was increased, the moisture content and mass yield were decreased. The highest mass yield and energy yield was found at 3 rpm with 230 degree celsius.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความดูแลเอาใจใส่ และได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาหลายๆท่าน คือ อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธาราวดี อาจารย์ ดร.ณัฐ รัชยะพงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติพงศ์ โสภณพงษ์พิพัฒน์ ที่ช่วยในการให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจแก้ไข ให้ข้อเสนอแนะ และติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์ทั้งห้าท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. สุระ ตันดี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยราชภัฏจลีสาน ซึ่งเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญ ที่สละเวลาในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย ตรวจทานความถูกต้องของภาษาในการจัดพิมพ์เล่มวิทยานิพนธ์เล่มนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับความช่วยเหลือและกำลังใจจากคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้วิจัยไม่อาจกล่าวนามได้หมด ผู้วิจัยรู้สึกขอบพระคุณในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้



ณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	3
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.....	3
1.7 ความจำกัดของการวิจัย.....	4
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2	5
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ชีวมวล	5
2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล.....	5
2.1.1.1 เซลลูโลส	5
2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส	5

2.1.1.3	ลิกนิน.....	5
2.1.1.4	แป้ง.....	6
2.1.1.5	โปรตีน.....	6
2.1.1.6	สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์).....	6
2.1.2	ปริมาณของชีวมวลในประเทศไทย.....	6
2.1.3	ข้อดีและข้อเสียของเชื้อเพลิงชีวมวล	8
2.1.3.1	ข้อดีของชีวมวล.....	8
2.1.3.2	ข้อเสียของชีวมวล.....	9
2.2	การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล.....	9
2.3	กระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction).....	10
2.3.1	หลักการทํางานของกระบวนการทอรีแฟคชัน	13
2.3.2	ผลของชีวมวลที่ผ่านการกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction).....	14
2.3.2.1	ค่าความร้อน.....	14
2.3.2.2	ค่าความชื้น	16
2.3.2.3	ความหนาแน่นบักก์.....	18
2.3.2.4	ความทนทาน.....	19
2.3.2.5	จีเถ้า.....	19
2.3.2.6	ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	20
2.3.2.7	คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon).....	21
2.3.2.8	ความไม่ชอบน้ำ.....	21
2.3.2.9	การวิเคราะห์ประมาณและแบบแยกธาตุ.....	21
2.4	Rotary kiln.....	23
2.4.1	ลักษณะทั่วไปของ Rotary kiln	23

2.4.2 ชนิดของ Rotary kiln.....	23
2.4.2.1 Wet Kilns	23
2.4.2.2 Long Dry Kilns	24
2.4.2.3 Short Dry Kilns	25
2.4.2.4 Cooler and Dryer Kilns.....	26
2.4.2.5 Indirect fired Kiln	26
2.4.3 ส่วนประกอบของเตาเผา.....	27
2.4.3.1 ห้องเผา.....	27
2.4.3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อนเตาเผา (Driver Gear).....	28
2.4.3.3 แหล่งความร้อน (Heater).....	28
2.4.3.4 ไบกาน (lifter).....	29
2.5 การใช้งาน Rotary kiln.....	29
2.6 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาแบบหมุน	30
2.7 Rotary kiln torrefaction	30
บทที่ 3	32
วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย.....	32
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวลสำหรับทอริไฟร์	32
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2 สถานที่ทำการวิจัย	37
3.3 ระยะเวลาการวิจัย	37
3.4 งบประมาณการวิจัย	37
3.5 การวางแผนการวิจัย	38

3.5.1	แผนการดำเนินงาน.....	38
3.5.2	แผนการทดลอง.....	39
3.6	วิธีการทดลอง.....	41
3.7	การวิเคราะห์ผล.....	43
3.7.1	ค่าความร้อน.....	43
3.7.2	ค่าความชื้น.....	44
3.7.3	ค่าผลได้เชิงมวล.....	44
3.7.4	ผลได้เชิงพลังงาน.....	45
บทที่ 4	46
	สรุปผลและอภิปรายผล.....	46
4.1	เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	46
	46
4.2	การกระจายตัวของอนุกรมุภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	48
4.3	โปรไฟล์อนุกรมุภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	49
4.4	residence time.....	50
4.5	ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	51
4.6	ความชื้น.....	52
4.6	การกระจายตัวของขนาดอนุภาค.....	53
4.6.1	แกลบ.....	53
4.6.1.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที.....	53
4.6.1.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส.....	55

4.6.2	ซิ่งข้าวโพด	57
4.6.2.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซิ่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที	57
4.6.2.2	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซิ่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส	59
4.7	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน	61
4.7.1	แกลบ	61
4.7.1.1	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	61
4.7.1.2	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	62
4.7.1.3	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที	63
4.7.1.4	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส	64
4.7.1.5	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	65
4.7.1.6	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส	66
4.7.2	ซิ่งข้าวโพด	67
4.7.2.1	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซิ่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	67
4.7.2.2	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซิ่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	68
4.7.2.3	ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซิ่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที	69

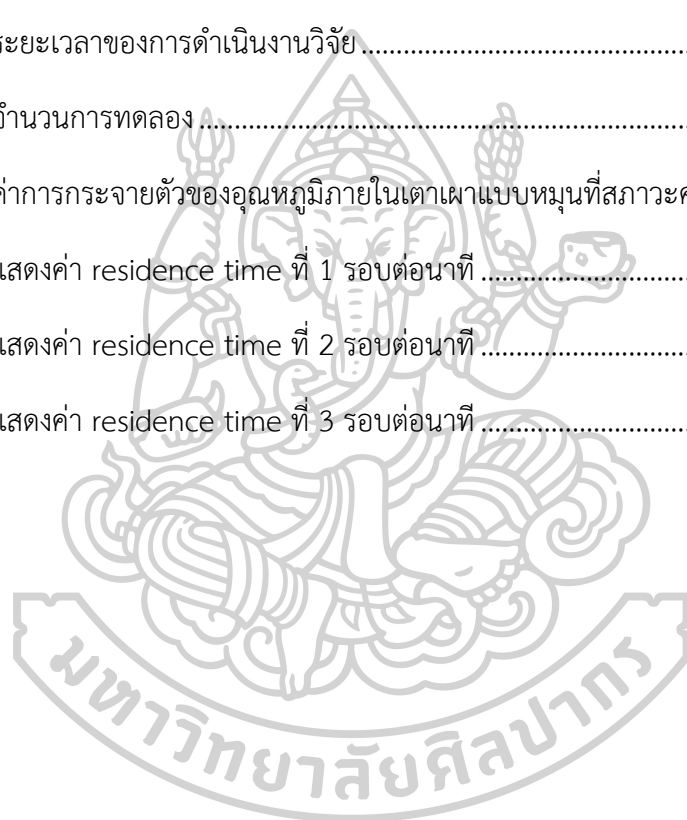
4.7.2.4 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 230 องศาเซลเซียส.....	70
70	
4.7.2.5 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส.....	71
71	
4.7.2.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิตั้งที่ 270 องศาเซลเซียส.....	72
บทที่ 5	73
สรุปผลวิจัย.....	73
รายการอ้างอิง	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ข	82
ค่าความชื้น	82
บทที่ 6 ตารางแสดงค่าความชื้นของแกลบก่อนและหลังกระบวนการทอริไฟร์แปดชั้น	83
บทที่ 7 ตารางแสดงค่าความชื้นของซังข้าวโพดก่อนและหลังกระบวนการทอริไฟร์แปดชั้น	84
ภาคผนวก ค	85
การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	85
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกลบที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	86
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกลบที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	87
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกลบที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที.....	88
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกลบที่อุณหภูมิตั้งที่ 230 องศาเซลเซียส.....	89
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกลบที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส.....	90
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกลบที่อุณหภูมิตั้งที่ 270 องศาเซลเซียส.....	91

การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	92
การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	93
การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที	94
การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส	95
การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	96
การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส	97
ภาคผนวก ง	98
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน	98
ภาคผนวก จ	101
เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน	101
ประวัติผู้เขียน	119



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณของชีวมวลในประเทศไทย	7
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชีวมวลแบบแยกธาตุ	22
ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร(พื้นฐานแห้ง)	23
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัย	37
ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลอง	41
ตารางที่ 4.1 ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนที่สภาวะคงตัว	49
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า residence time ที่ 1 รอบต่อนาที	50
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า residence time ที่ 2 รอบต่อนาที	51
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า residence time ที่ 3 รอบต่อนาที	51



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่น[10]	14
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อน[10] 14	14
รูปที่ 2.3 บอมบ์คาลอริมิเตอร์.....	15
รูปที่ 2.4 ตู้อบลมร้อน.....	17
รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบค่าความหนาแน่นบัคก์.....	18
รูปที่ 2.6 เครื่องวัดความทนทาน.....	19
รูปที่ 2.7 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค	20
รูปที่ 2.8 เตาเผาชนิดเปียก (Wet Kilns).....	24
รูปที่ 2.9 เตาเผาแบบแห้งชนิดยาว (Long Dry Kilns).....	25
รูปที่ 2.10 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kilns).....	25
รูปที่ 2.11 เตาเผาแบบ Cooler and Dryer	26
รูปที่ 2.12 เตาเผาแบบ Indirect fired.....	27
รูปที่ 2.13 เส้นทางการแลกเปลี่ยนความร้อนของชั้นวัสดุ 1. การนำความร้อนภายใน	30
รูปที่ 2.14 รูปการออกแบบของระบบเตาทอรีแฟคชั่นแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการ	31
รูปที่ 2.15 รูปแสดงแผนผังเตาทอรีแฟคชั่นแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการ.....	31
รูปที่ 3.1 เครื่องสับหยาบ.....	32
รูปที่ 3.2 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น	34
รูปที่ 3.3 แหล่งความร้อนของเตาเผาแบบหมุน	35
รูปที่ 3.4 Data logger (midi LOGGER GL820).....	36
รูปที่ 3.5 สายเทอร์โมคัปเปิล type K.....	36

รูปที่ 3.6	รูปแสดงแผนการวิจัยการปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการทอรีไฟร์.....	38
รูปที่ 3.7	รูปแสดงแผนการทดลองการปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวมวลฟางข้าวโดยการทอรีไฟร์ด้วย	39
รูปที่ 3.8	รูปแสดงแผนการทดลองการปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวมวลซังข้าวโพดโดยการทอรีไฟร์ด้วย	40
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการทดลอง.....	42
รูปที่ 4.1	เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล	46
รูปที่ 4.2	การไหลของชีวมวลและอากาศร้อนภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล	47
รูปที่ 4.3	การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการ	49
รูปที่ 4.4	โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	50
รูปที่ 4.5	ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	52
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงค่าความชื้นของชีวมวล	53
รูปที่ 4.7	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที.....	54
รูปที่ 4.8	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที.....	55
รูปที่ 4.9	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที.....	55
รูปที่ 4.10	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.11	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.12	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส	57
รูปที่ 4.13	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที .58	
รูปที่ 4.14	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที .58	
รูปที่ 4.15	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที .58	
รูปที่ 4.16	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส.59	
รูปที่ 4.17	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส.60	
รูปที่ 4.18	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส.60	

รูปที่ 4.19 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที.....	61
รูปที่ 4.20 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที.....	62
รูปที่ 4.21 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที.....	63
รูปที่ 4.22 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส.....	64
รูปที่ 4.23 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส.....	65
รูปที่ 4.24 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส.....	66
รูปที่ 4.25 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	67
รูปที่ 4.26 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	68
รูปที่ 4.27 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที	69
รูปที่ 4.28 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส	70
รูปที่ 4.29 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	71
รูปที่ 4.30 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยปัญหาทางเศรษฐกิจและวิกฤตด้านพลังงานโลกในปัจจุบัน ทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานซึ่งได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน [1]เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ทันกับความต้องการในการใช้พลังงานที่มากขึ้นเนื่องจากต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิตภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาพลังงานทางเลือก (Alternative energy) ชนิดใหม่มาใช้ทดแทน เช่น พลังงานจากชีวมวล (Biomass) [2] ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากอินทรีย์สารของพืชชนิดต่างๆ ได้แก่ พืชเกษตรกรรม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เศษไม้ ฯลฯ โดยใช้กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง การผลิตก๊าซ การหมักและการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช โดยคุณสมบัติที่สำคัญของพลังงานทางเลือกคือเป็นพลังงานสะอาดมีการปลดปล่อยก๊าซมลภาวะที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและสามารถสร้างทดแทนขึ้นใหม่ได้ตลอดเวลาในระยะเวลาอันสั้น

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการนำชีวมวลที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ผลิตพลังงานกันอย่างแพร่หลายส่งผลให้ชีวมวลบางชนิดมีราคาสูงขึ้นและเกิดปัญหาขาดแคลนในบางท้องถิ่น เช่น แกลบ ชี้อ้อย ฯลฯ แต่ยังคงพบว่ามีชีวมวลอีกจำนวนมากที่ยังไม่ถูกนำมาใช้ผลิตพลังงาน เช่น ฟางข้าว ยอดอ้อยและใบอ้อย ทางปาล์มน้ำมัน ลำต้นข้าวโพดเนื่องจากคุณสมบัติของชีวมวลดังกล่าวซึ่งเป็นวัสดุคลุมเบาและมักจะถูกกองทิ้งไว้บริเวณพื้นที่เพาะปลูกภายหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ต้นทุนในการเก็บรวบรวมและขนส่งเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหากจะนำชีวมวลดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการผลิตพลังงาน จำเป็นต้องมีการศึกษาและกำหนดแนวทางในการเก็บรวบรวมตลอดจนบริหารจัดการชีวมวลดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การแปรรูปให้เป็นชีวมวลอัดเม็ด (Biomass Pellet) หรือเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความหนาแน่นให้กับชีวมวล ทำให้ต้นทุนการขนส่งเชื้อเพลิงลดลง การปรับปรุงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อลดข้อด้อยของชีวมวลเช่น การสับละเอียด การขึ้นรูป อีกทั้งกระบวนการทอรีไฟรที่ช่วยให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนที่สูงขึ้น มีความไม่ชอบน้ำ (ทำให้สามารถจัดเก็บได้สะดวกและอยู่ได้เป็นเวลานาน)

กระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction) เป็นกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีด้วยความร้อนที่มีค่าอยู่ในช่วง 220 - 300 องศาเซลเซียสในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน กระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction) ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮดรอกซิเลชัน (Dehydroxylation)

และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ส่งผลต่อการลดลงของอัตราส่วนระหว่าง ออกซิเจน (O) ต่อคาร์บอน (C) และอัตราส่วนระหว่าง ไฮโดรเจน (H) ต่อคาร์บอน (C) เมื่อเทียบกับ ชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction) [3-6] ผลที่ได้คือ ค่าความหนาแน่นของ พลังงานที่สูงขึ้น ส่งผลให้ชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction) มีข้อจำกัดใน ด้านความชื้นลดลง ซึ่งประสิทธิภาพของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction) วัด ได้จากตัวแปรเหล่านี้ คือ ความชื้น สารระเหย ความหนาแน่น ค่าความร้อน คุณสมบัติทางเคมีและ ทางกายภาพของชีวมวล ซึ่งผลของตัวแปรขึ้นอยู่กับทางเลือกประเภทของเตาเผาและช่วงของอุณหภูมิ [7-9]

เตาเผาทอรีไฟร์เป็นเตาเผาที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติชีวมวลแต่โดยมากเตาจะมีความไม่แน่นอนเชิงผลผลิตที่สูงมาก กล่าวคือผลผลิตที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากเตาแบบทั่วไปโดยส่วนใหญ่ไม่สามารถที่จะทำให้ความร้อนกระจายเข้าสู่ชีวมวลได้อย่างทั่วถึง ซึ่งมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของชีวมวลเช่นกัน

เตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) เป็นเตาเผาที่มีความน่าสนใจในการใช้งานอย่างแพร่หลายใน หลายๆอุตสาหกรรม เช่น การเผาขยะ ปูนซีเมนต์ เป็นต้น ด้วยข้อดีคือสามารถทำให้ความร้อน กระจายสู่วัตถุดิบได้อย่างทั่วถึง สามารถปรับรูปแบบการทำงานได้อย่างหลากหลาย มีผลทำให้ผลผลิต ที่ได้มีความสม่ำเสมอและมีคุณภาพที่สูงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในประเทศไทยมีการนำเตาเผา แบบหมุนมาใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลที่น้อยมาก ทำให้เรามองค้ความรู้เกี่ยวกับการ ประยุกต์ใช้และตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพที่น้อยมาก เนื่องจากลักษณะเชื้อเพลิงต่างชนิดในแต่ ละงานวิจัยพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทอรีไฟร์เชื้อเพลิงชีวมวลในแต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่าง กันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความคิดที่จะศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลด้วย กระบวนการทอรีแฟคชันโดยเตาเผาแบบหมุน และศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลก่อนและหลังผ่าน กระบวนการทอรีแฟคชันในด้านต่างๆคือ ความหนาแน่น ความหนาแน่นบ้คค์ ความชื้น ค่าความไม่ ชอบน้ำ และค่าความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างเตาเผาชีวมวลแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันในเตาเผาแบบหมุน

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1.3.1 การใช้เตาเผาแบบหมუნช่วยทำให้ผลผลิตที่ได้มีความสม่ำเสมอ
- 1.3.2 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชันจะส่งผลต่อคุณสมบัติของผลผลิตที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1. ทำการทอรีไฟร์เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเตาเผาแบบหมუნ
- 1.4.2 ใช้อัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาเผาแบบหมუნเท่ากันสำหรับชีวมวลทุกชนิดที่ 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
- 1.4.3 แหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันของเตาเผาแบบหมუნคือแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG)
- 1.4.4 ชีวมวลที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ ชังข้าวโพด และ แกลบ
- 1.4.5 ใช้ความเร็วรอบในการหมุนเตาเผาแบบหมუნ 3 ค่า คือ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที
- 1.4.6 ใช้อุณหภูมิสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน 3 ค่าคือ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

- 1.5.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษากระบวนการทอรีแฟคชัน และหลักการทำงานของเตาเผาแบบหมუნ
- 1.5.2 ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรของกระบวนการทอรีแฟคชันโดยใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นแหล่งความร้อน
- 1.5.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทอรีไฟร์

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

- 1.6.1 การทดลองทอรีแฟคชันจะดำเนินการภายใต้เตาทอรีแฟคชันแบบหมუნ โดยทำการทดลองที่คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์
- 1.6.2 การทดลองหาปัจจัยที่มีผลต่อการทอรีไฟร์ คือ อุณหภูมิ ความเร็วรอบของการหมุน จะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขอบเขตของการทดลองเท่านั้น

1.7 ความจำกัดของการวิจัย

ทำการศึกษาคุนสมบัติ ความชื้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ผลได้เชิงมวล ผลได้เชิงพลังงาน ของชีวมวล 2 ชนิดคือ แกลบ และ ชังข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 ชีวมวล (Biomass) คือ สิ่งที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต เช่น ต้นไม้ ชานอ้อย มันสำปะหลัง ถ่าน ฟืน แกลบวัชพืชต่างๆหรือแม้กระทั่งขยะและมูลสัตว์เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้

1.8.2 ทอริแฟคชัน (Torrefaction) เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) อย่างอ่อนที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยเพื่อไม่ให้ ชีวมวลเกิดการเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการ

1.8.3 เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว เอียงเล็กน้อย มีตัวมอเตอร์เพื่อขับให้ตัวเตาหมุนตลอดเวลา มีลักษณะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงภายในห้องเผาไหม้จึงประกอบไปด้วยวัสดุทนไฟ สามารถควบคุมระยะเวลาการเผาไหม้และปริมาณของวัตถุดิบที่จะเผาได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือสิ่งที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตเช่นต้นไม้ धान อ้อย มันสำปะหลัง ถ่านฟืน แกลบ วัชพืชต่างๆ หรือแม้กระทั่งขยะและมูลสัตว์ เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมียุ่่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยักรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งนี้อาจจะสามารถจำแนกแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 2 แหล่งดังนี้ ของเสียจากการประกอบการทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม อาทิเช่น ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว धान อ้อย เป็นต้น รวมไปถึงของเสียประเภทพลาสติกและกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และของเสียจากแหล่งชุมชน อาทิเช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ของเสียจากสัตว์ เช่น มูลสัตว์ เป็นต้น

2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

2.1.1.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งปีต้า-1,4 (b-1,4) เป็นสายยาวมากกว่า 2,000 โมเลกุล เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึกและต้านทานต่อกรดและด่าง

2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลส

โพลีแซ็กคาไรด์ซึ่งมีจำนวนยูนิตคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซ็กคาไรด์รวมถึง ดีไซโลสและดีอะราไบโนส และคาร์บอนกับ 6 โมโนแซ็กคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส ดีกาแลคโตสและดีกลูโคส โมโนแซ็กคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 5 มีจำนวนมากกว่า โมโนแซ็กคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 6 เนื่องจากดีกรีโพลีเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50-200 โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถละลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลสเป็นจำนวนมากสามารถละลายได้ในสารละลายเบส เฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือไซแลนซึ่งประกอบด้วยไซโลสด้วยพันธะ 1,4 เฮมิเซลลูโลสโดยทั่วไปมีอยู่ประมาณ 20-40 % โดยน้ำหนัก

2.1.1.3 ลิกนิน

สารประกอบที่ประกอบด้วย ยูนิตฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ ซึ่งเชื่อมกันเป็นสามมิติโครงสร้างนั้นซับซ้อนและยังไม่มีกรเข้าใจอย่างแท้จริง โครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลินทรีย์และ

สารเคมี นอกนั้นยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันร่วมกัน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ถูกพบอย่างสากลในสารชีวมวลชนิดต่างๆและแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก

2.1.1.4 แป้ง

โพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของดีกลูโคส แต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟาไกลูโคไซด์ิก เนื่องจากความต่างของโครงสร้างพันธะ เซลลูโลสละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้ง จะละลายในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณ 10% - 20%ของแป้ง) และ บางส่วนที่ไม่ละลาย แป้งถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้น ซึ่งถือเป็นอาหาร

2.1.1.5 โปรตีน

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของโพลิเมอร์เช่เช่น โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่าสามสารข้างต้นที่กล่าวมา

2.1.1.6 สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ มีได้หลากหลายขึ้นกับชนิดสารอินทรีย์ ที่มีจำนวนมาก ได้แก่ กลิเซอรอล และซูโครส[10]

2.1.2 ปริมาณของชีวมวลในประเทศไทย

นอกจากนี้ในการนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานต้องคำนึงถึงปริมาณที่มากพอต่อการแปรรูปจึงเหมาะกับประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ข้าว ยางพารา น้ำมันปาล์ม และมันสำปะหลัง เป็นต้น และในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ จะมีวัสดุเหลือใช้ออกมาจำนวนหนึ่ง คือ ชีวมวล ที่มีปริมาณมหาศาลกระจายตัวอยู่ทั่วประเทศ การกระจายตัวของแหล่งชีวมวลมีรูปแบบการกระจายตัวเป็น 2 ลักษณะ คือ อยู่รวมเป็นกลุ่มและอยู่กระจัดกระจายชีวมวลที่อยู่รวมเป็นกลุ่ม คือ เศษชีวมวลจากกระบวนการแปรรูป ณ ที่ใดที่หนึ่ง เช่น โรงสีข้าว โรงงานผลิตน้ำ ตาลทราย โรงงานแปรรูปมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เป็นต้น และที่อยู่กระจัดกระจายตามพื้นที่เพาะปลูกหรือไม่มีการรวบรวม เช่น การสีข้าวโพดโดยอุปกรณ์สีข้าวโพดที่เคลื่อนที่ได้ เศษไม้ปลายไม้จากสวนป่ายางพารา ใบอ้อยในไร่ อ้อย 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	ชาน อ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอด และใบ	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
		ฟาง ข้าว	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
ปาล์ม น้ำมัน	8,162,379	ทะลาย เปล่า	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 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
ไม้ ยางพารา	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 เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้นซึ่งจากต่างน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลายาวหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

2.1.3.1 ข้อดีของชีวมวล

- การนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้า จะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง

การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่ง หรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า

- ลดการใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ฟอสซิล ปีโตรเลียม เป็นต้น อีกทั้งเชื้อเพลิงจากชีวมวลหาได้ง่ายและถูกกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล
- เป็นการลดขยะรวมถึงเพิ่มคุณค่าที่เหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรม เพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรที่ขายวัสดุให้กับโรงงาน เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุด
- ในชุมชนสามารถตั้งโรงไฟฟ้าขนาดเล็กได้เพื่อใช้เองและขายให้การไฟฟ้าหรือภาคอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับชุมชน

2.1.3.2 ข้อเสียของชีวมวล

- ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดทั้งปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อยมีจำกัดเพียงบางเดือน
- ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่าแหล่งพลังงานอื่นๆ จำพวกปิโตรเลียมและถ่านหิน
- ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูงเป็นปัญหาต่อการจัดเก็บ และส่งผลให้เป็นปัญหาในการเผาไหม้ เกิดการสูญเสียความร้อนและเกิดมลพิษสูง
- ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ จึงต้องใช้ในปริมาณที่มาก และต้องใช้อุปกรณ์ในการจัดเก็บ การเก็บรักษา การขนส่ง และการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่
- รูปแบบกายภาพไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว ไม่สะดวกต่อการขนย้าย ตรวจสอบ เก็บรักษา จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า การนำชีวมวลมาประยุกต์ใช้ย่อมเกิดประโยชน์มากกว่าโทษด้วยเหตุผลหลายๆประการ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการลดข้อเสียดังกล่าวของชีวมวลให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพมีการกระทำกันด้วยกระบวนการและเทคโนโลยีต่างๆอย่างแพร่หลายเพื่อลดข้อเสียของชีวมวลให้มากที่สุด

2.2 การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล

การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล จะช่วยในการลดปริมาณความชื้นซึ่งส่งผลให้เพิ่มค่าความร้อน และมีความสะดวกในการเก็บรักษา และปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลให้สะดวกต่อการใช้ การปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆคือ

2.2.1 กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง การคัดแยกเฉพาะส่วน และการบีบคั้นน้ำมัน

2.2.2 กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical conversion) ที่ใช้กิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยโดยปราศจากอากาศเพื่อผลิตก๊าซชีววมวล และกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล

2.2.3 กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) โดยกระบวนการนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆได้อีกคือ การเผาไหม้ ไพโรไลซิส และ ก๊าซซิฟิเคชัน [4]

ทั้งนี้ลักษณะและความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาพที่ใช้และวัตถุดิบ หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ ถึงแม้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีจะเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ค่อนข้างที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน เนื่องจากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีววมวลค่อนข้างมาก จึงทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่า ทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่หลากหลายกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี

2.3 กระบวนการทอริแฟคชัน (Torrefaction)

กระบวนการทอริแฟคชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) อย่างอ่อนที่ให้ความร้อนแก่ชีววมวลที่อุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยเพื่อไม่ให้ชีววมวลเกิดการเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการ กระบวนการทอริแฟคชันนี้เป็นการปรับปรุงชีววมวล และยังช่วยลดข้อด้อยของชีววมวลได้จริง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้ชีววมวลมีค่าความร้อนต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น การดูดความชื้นกลับลดลง และมีความกรอบทำให้ง่ายต่อการนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ ส่งผลให้สะดวกในการขนส่งและการเก็บรักษา ความชื้นลดลงและมีปริมาณพลังงานสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีววมวลดิบ [5] ลดอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ความไม่ชอบน้ำ อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษาชีววมวลในปริมาณที่มากขึ้นด้วย

Jaya S. T. et.al., (2011) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอริแฟคชันชีววมวลเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของชีววมวลในเชิงของคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่น่าสนใจ กระบวนการทอริแฟคชันเป็นการให้ความร้อนกับชีววมวลอย่างช้าๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อย ในช่วงอุณหภูมิที่สูงที่สุด 300 องศาเซลเซียส กระบวนการทอริแฟคชันสามารถที่จะกำหนดเป็นกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลมาจากการควบคุมในบางส่วนและการไพโรไลซิสชีววมวล จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 - 280 องศาเซลเซียส ดังนั้นกระบวนการนี้สามารถเรียกได้ว่าเป็นไพโรไลซิสอย่างเบาที่

จะเกิดขึ้นในช่วงของอุณหภูมิที่ต่ำกว่า กระบวนการทอรีแฟคชันจะดำเนินการผลิตของแข็งที่มีปริมาณความชื้นต่ำและค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวลดิบ ส่วนที่สำคัญที่สุดขององค์ประกอบของควันและสารระเหยจะถูกนำออกไปในระหว่างการทอรีแฟคชัน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้มวลที่ต่ำกว่าแต่มีค่าความร้อนที่สูงกว่า โดยทั่วไปจะเกิดการสลายตัวและการคาร์บอนไนเซชันของเฮมิเซลลูโลส การลดการสลายตัวและการเกิดสารระเหยของลิกนินและเซลลูโลส คุณสมบัติของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ได้แก่ ความสามารถในการบด ความสามารถในการขึ้นรูป ค่าความไม่ชอบน้ำ ดังนั้นจะมีการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงาน จะมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของ Ultimate และ proximate จากการเพิ่มของปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนและการลดลงของปริมาณความชื้นและออกซิเจน [11]

Chen W.H. et al., (2011) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการทอรีแฟคชันเปลือกไม้ (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% การเพิ่มค่าความสามารถในการบดและค่าความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงมวลที่สูญเสียของไม้ จะทำได้ในช่วงอุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ไม้ที่ได้ทำปฏิกิริยากว่า 50% จะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่ถูกควบแน่นนั้นคือ monoaromatics ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยๆ ของ heterocyclic hydrocarbons ที่ได้รับจากกระบวนการทอรีไฟร์ [12]

Phanphanich M. et al., (2011) ได้ทำการศึกษาลักษณะของเชื้อเพลิงและความสามารถในการบดของแผ่นไม้สนและไม้ซุงที่ได้รับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 225 - 300 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพการบดของชีวมวลทอรีไฟร์จะประเมินจากพลังงานที่ต้องการในการบด การกระจายของขนาดอนุภาคและขนาดของอนุภาคเฉลี่ย เพื่อที่จะเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบและถ่านหิน จากการศึกษาพบว่า พลังงานจำเพาะที่ต้องการในการบดของชีวมวลทอรีไฟร์นี้จะลดลงไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ พลังงานการบดของชีวมวลทอรีไฟร์จะลดลงเป็น 24 kW/h ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของแผ่นไม้สนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ด้วยกระบวนการทอรีแฟคชันของชีวมวลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเป็นการปรับปรุงเชื้อเพลิงและปรับปรุงคุณสมบัติในการบดที่ใกล้เคียงกับถ่านหิน [13]

T.G. Bridgeman. et al., (2008) ได้ทำการศึกษาทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชัน ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ด้วยชีวมวลทั้งสามชนิด คือ ดอกหญ้า ฟางข้าว และวิลโลว์ การประเมินผลิตภัณฑ์และมวลพลังงานที่สูญเสียในระหว่างกระบวนการได้ทำการศึกษาในขนาดห้องปฏิบัติการ การทดลองที่สภาวะกระบวนการทอรีแฟคชันที่แตกต่างกันจะดำเนินการตรวจสอบหา

ความเหมาะสมของกระบวนการของชีวมวลทั้งสามชนิดนี้ กระบวนการทอรีแฟคชันจะดำเนินการวิเคราะห์ทางเคมีและลักษณะของชีวมวลเริ่มต้นจะคล้ายกับถ่านหิน นอกจากนี้จะชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบของสารระเหยจะลดลง และการผลิตพลังงานทางเลือกจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เสถียรกว่า แต่ในระหว่างการเผาไหม้ความร้อนของปฏิกิริยาจะดีกว่า ความแตกต่างระหว่างผลได้ของพลังงานและมวลจะปรับปรุงอุณหภูมิทอรีแฟคชันที่สูงกว่า พฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลดิบและชีวมวลทอรีไฟร์จะได้รับการศึกษาด้วย differential thermal analysis (DTA) จากอนุภาคแขวนลอยเดี่ยวใน methane-air flame และการดำเนินการเผาไหม้จะเก็บผลด้วยกล้องความเร็วสูง แสดงให้เห็นว่าสารระเหยและทาร์ที่ได้จากการทอรีไฟร์ชีวมวลจะคายพลังงานเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบและจะขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการทอรีแฟคชัน เชื้อเพลิงทอรีไฟร์จะมีพลังงานที่สูงถึง 96% ต้นวิลโลว์ทอรีไฟร์จะจุดติดไฟได้อย่างรวดเร็ว อาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณความชื้นมีค่าต่ำทำให้จุดติดไฟได้อย่างรวดเร็ว อนุภาคทอรีไฟร์จะเริ่มต้นด้วยการเผาไหม้ซาร์ที่เร็วกว่าการเผาไหม้วิลโลว์ [14]

วิชุดา เมตตานันท์ และคณะ (2556) : ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติกึ่งยาสูบด้วยการทอรีแฟคชัน ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้กึ่งยาสูบที่ยังไม่ได้ผ่านการทอรีแฟคชัน 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 (fix-bed reactor) การทดลองทำที่ความดันบรรยากาศโดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 220, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที ส่งผลให้มี 9 กรัม อัตราการเพิ่มอุณหภูมินั้นกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที นอกจากนี้ยังมีการใช้ก๊าซไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ระดับ 99.9 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ให้ไหลผ่านเตาปฏิกรณ์ตลอดการทดลองเพื่อให้ภายในเตาปราศจากออกซิเจน หลังการทดลองได้นำชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชันไปวัดค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมม์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น LECO AC-350

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

- ผลของอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าความร้อนของกึ่งยาสูบพบว่าอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันส่งผลต่อค่าความร้อนของกึ่งยาสูบมากกว่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเมื่อเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นๆ ที่อุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชันเดียวกันคือ 280 องศาเซลเซียส และ 120 นาที พบว่า ค่าความร้อนสูงของกึ่งยาสูบมีค่าใกล้เคียงกับชีวมวลอื่นๆ ได้แก่ ไม้สน ไม้เบิร์ช และชานอ้อย

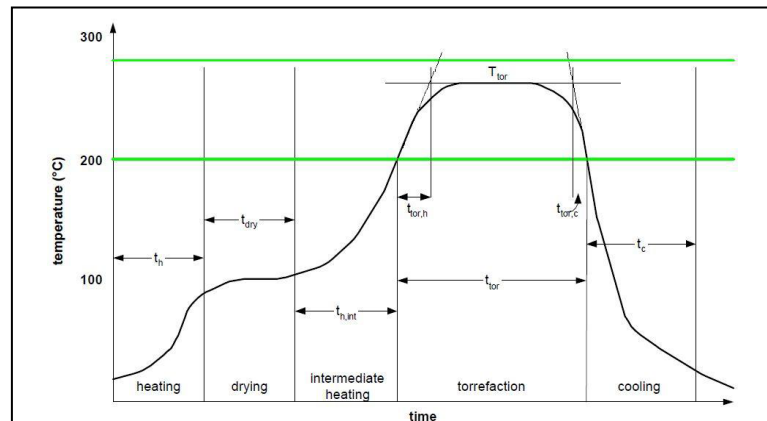
- ผลของอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อการดูดความชื้นกลับของกึ่งยาสูบพบว่ากึ่งยาสูบที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น มีการดูดความชื้นกลับต่ำกว่ากึ่งยาสูบที่ไม่ผ่านกระบวนการโดยการดูดความชื้นกลับของกึ่งยาสูบลดลงมากที่สุดถึง 54.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการทดสอบการดูดความชื้นกลับของกึ่งยาสูบนั้นทำโดย การชั่งน้ำหนักกึ่งยาสูบหลังจากถูกแช่ในน้ำเป็นเวลาต่างๆ จากนั้นคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นกลับ

จากตัวอย่างงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากึ่งยาสูบมีคุณสมบัติดีขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น ซึ่งเป็นกระบวนการลดความชื้นในชีวมวล และยังเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หากเปรียบเทียบชีวมวลที่ผ่านกระบวนการและไม่ผ่านกระบวนการชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่น จะดูดความชื้นกลับลดลงมากที่สุดถึง 54.43 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นชัดว่า หากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น จะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นจากชีวมวลปกติ

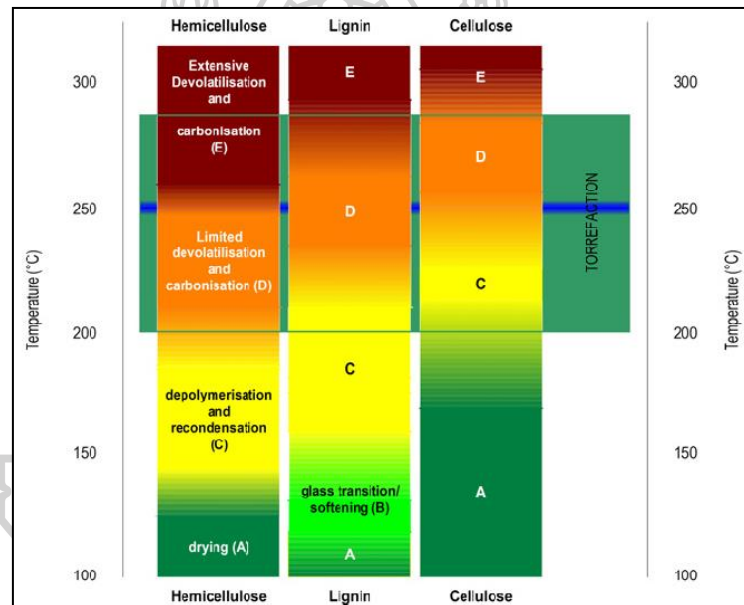
2.3.1 หลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น

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

โดยชีวมวลดิบถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในขั้นตอนการทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิชีวมวลดิบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง ในกระบวนการทำความร้อนอัตราการทำความร้อนควรต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่ออนาที เมื่อชีวมวลดิบเข้าถึงอุณหภูมิที่ต้องการโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 90 - 150 องศาเซลเซียส เป็นการเริ่มต้นการอบแห้งชีวมวลดิบ น้ำอิสระภายในชีวมวลจะระเหยและปริมาณความชื้นของชีวมวลดิบจะลดลง มันเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเอาน้ำออกจากชีวมวลดิบ ซึ่งหากไม่มีการดำเนินการดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายทางความร้อนชีวมวลดิบในขั้นตอนทอรีแฟคชั่น เมื่อขั้นตอนแรกสิ้นสุดลง ชีวมวลถูกให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่เรียกว่าขั้นตอนการทำความร้อนชั้นกลาง ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น อุณหภูมิของชีวมวลถูกรักษาให้คงที่ในช่วง 200 - 300 องศาเซลเซียส ในระหว่างช่วงเวลาการย่อยสลายทางความร้อน เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวในสารชีวมวลดิบที่ช่วงแรกอุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส ต่อมาลิกนินและบางส่วนของเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 270 - 300 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อนจะแสดงดังรูปที่ 2.1 ขั้นตอนการทอรีแฟคชั่นจะสำเร็จเมื่อการทอรีไฟร์ชีวมวลถูกเพิ่มในอุณหภูมิสูงและการทำเย็นนั้นจะต้องไรร้ออกซิเจนหรือทั้งสองกระบวนการอยู่ในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย [5]



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกระบวนการทอริแฟคชัน[10]



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของชีวมวลติจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อน[10]

2.3.2 ผลของชีวมวลที่ผ่านการกระบวนการทอริแฟคชัน (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 [1] ด้วยมาตรฐาน ASTM –E 711 [15], NBR 8633/84 standard [16]

r



รูปที่ 2.3 บอมบ์คาลอริมิเตอร์

การคำนวณค่าความร้อน

การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่แท้จริง ได้ดังสมการ

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (1)$$

- เมื่อ
- a คือ เวลาของการจุดระเบิด
 - b คือ เวลาเมื่ออุณหภูมิถึง 60% ของที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด
 - c คือ เวลาที่เริ่มต้นของคาบ (หลังจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น)ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิกลายเป็นคงที่

- t คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ถูกต้อง (องศาเซลเซียส)
- t_c คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่อ่านได้
- t_a คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ที่เวลาจุดระเบิด
- r_1 คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาทีก่อนจุดระเบิด
- r_2 คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาทีหลังจากเวลาที่

เริ่มต้นของคาบ c

ค่าความร้อนกรอสของการเผาไหม้

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (2)$$

เมื่อ	H_g	คือ ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้ (จุลต่อกรัม)
	W	คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอรีมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
	m	คือ มวลของตัวอย่างเป็น (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 สายฟิวนิคเกิลโครม)

ค่ามาตรฐานแคลอรีมิเตอร์

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_3}{t} \quad (3)$$

เมื่อ	W	คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอรีมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
	H	คือ Heat of combustion of Standard benzoic acid (ให้พลังงาน 6318 แคลอรีต่อกรัม)
	m	คือ มวลของตัวอย่างเป็นกรัม
	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 สายฟิวนิคเกิลโครม)

2.3.2.2 ค่าความชื้น

ปริมาณความชื้น (moisture content) แสดงออกมาเป็นสัดส่วนน้ำหนักของความชื้นต่อน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงแห้งหรือน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงรวมทั้งหมด

ค่าความชื้นสามารถหาได้จากสมการ

$$M\% = \frac{W_0 - W_f}{W_0} \quad (4)$$

- เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิง (กรัม)
 W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของเชื้อเพลิง (กรัม)
 M คือ ความชื้นเปียก (เปอร์เซ็นต์)

หากคุณปริมาณความชื้นด้วย 100 จะได้เป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นในชีวมวล 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 ฉะนั้นจุดอิ่มตัวของเส้นใยจึงเป็นจุดที่บ่งบอกถึงการหดตัวหรือการบวมของเนื้อไม้หากมีการดึงน้ำออกหรือเติมน้ำเข้าไปในเนื้อไม้ โดยทั่วไปจุดอิ่มตัวของเส้นใยของไม้จะอยู่ที่ประมาณ 23-27% ของมวลรวมทั้งหมด โดยในการวัดค่าความชื้นนั้นจะทำการนำเชื้อเพลิงเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความชื้นของเชื้อเพลิง โดยรูปตู้อบลมร้อนจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตู้อบลมร้อน

2.3.2.3 ความหนาแน่นบักก์

ค่าความหนาแน่นบักก์ คือน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM E-873 [17] ด้วยการบรรจุลงในกล่องกว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.3 เมตร และสูง 0.3 เมตร โดยปล่อยเชื้อเพลิงด้วยความสูงจากปากของกล่อง 0.61 เมตร จากนั้นเอากล่องกระทบพื้นจากความสูง 0.15 เมตร เป็นจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณค่า ความหนาแน่นบักก์ โดยเครื่องวัดค่าความหนาแน่นบักก์จะแสดงดังรูปที่ 2.5

$$\rho_{bulk} = \frac{m_f - m_b}{v_b} \quad (4)$$

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



รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบค่าความหนาแน่นบักก์

2.3.2.4 ความทนทาน

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

$$PDI = 100 \times \frac{WPW}{IW} \quad (5)$$

เมื่อ PDI คือ ค่าความทนทานแห้งเชื้อเพลิง
 WPW คือ น้ำหนักแห้งชีวมวลที่สมบูรณ์ไม่แตกหัก
 IW คือ น้ำหนักแห้งชีวมวลเริ่มต้น



รูปที่ 2.6 เครื่องวัดความทนทาน

2.3.2.5 ชี๊ถั่ว

ชี๊ถั่วเป็นสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือของของแข็งหลังจากเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ส่วนประกอบที่สำคัญของมันคือ ซิลิกา อะลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียม จำนวนของ แมกนีเซียม ไททาเนียม โซเดียม และโพแทสเซียม เล็กน้อย ปริมาณชี๊ถั่วสามารถคำนวณได้โดยการทดสอบตามมาตรฐานเอเอสทีเอ็ม (ASTM) D-1102 สำหรับไม้ E-1755-01 สำหรับชีวมวลอื่น และสำหรับถ่านหิน D-3174 ตามมาตรฐาน D-1102 ซึ่งตัวอย่างจำนวน 2 กรัมของไม้ตัวอย่าง (ขนาดต่ำกว่า 475 ไมครอน) จะถูกเผาที่อุณหภูมิ 580 ถึง 600 องศาเซลเซียส เมื่อคาร์บอนทั้งหมดถูกเผา ตัวอย่างจะถูก

ทำให้เย็นลงและถูกซั่ง ตามมาตรฐาน E-1755-01 จำนวน 1 กรัมของชีวมวลถูกทำให้แห้งด้วยความร้อนเริ่มต้นที่ 250 องศาเซลเซียสที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้เวลา 30 นาที จากนั้นอุณหภูมิจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นเป็น 575 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นตัวลงและถูกซั่งน้ำหนัก สำหรับถ่านหรือถ่านหินมาตรฐาน D-3174-04 จะใช้ ตัวอย่างจำนวน 1 กรัมของตัวอย่าง (ที่มีความละเอียดต่ำกว่า 250 ไมครอน) ถูกให้ความร้อนจาก 450 เป็น 500 องศาเซลเซียส ที่ 1 ชั่วโมงแรก และจากนั้นเพิ่มเป็น 700 ถึง 750 องศาเซลเซียส (950 องศาเซลเซียส สำหรับถ่านหิน) ที่ชั่วโมงที่ 2 สำหรับ 2 ชั่วโมงหรือยาวนานกว่านั้นที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับการเผาไหม้ของคาร์บอน ถูกเอาออกจากเตาเผา ถูกทำให้เย็นลงและถูกซั่งน้ำหนัก ปริมาณซีเถ้าของชีวมวลปกติ น้อยมากๆ โดยปริมาณของซีเถ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณ โลหะอัลคาไลน์ เช่น โพตัสเซียมหรือเฮไลน์เช่น คลอรีน ซึ่งอาจทำให้เกิดตะกรัน และการกัดกร่อนในหม้อต้มน้ำ หรือ ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน

2.3.2.6 ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคคือกระบวนการที่ใช้ในการประเมินการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุที่เป็นเม็ด การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตวัสดุ การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ และนำค่าของที่เหลือตกอยู่บนตะแกรงมาวิเคราะห์ โดยรูปของเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค

2.3.2.7 คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

คาร์บอนคงตัว (FC) ในเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการที่ ความชื้น สารระเหย และ ซี้เถ้า เป็นการแสดงปริมาณ คาร์บอนของแข็งในชีวมวลที่มีในถ่านของกระบวนการไพโรไลซิสหลังจาก ดีโวลไทไลเซชัน (devolatilization)

$$FC = 100 - M - VM - ASH \quad (6)$$

คาร์บอนของชีวมวลมาจากการ โป้ได้ซินทีซิสฟิเคชั่นของคาร์บอนไดออกไซด์และ สารอินทรีย์ทั้งหมด ระหว่างการหาค่าสารระเหย ส่วนของคาร์บอนอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเข้าไปใน วัสดุ ซึ่งถูกเรียกว่า ไพโรไลติก คาร์บอน ดังนั้นจำนวนของ คาร์บอนคงตัว ขึ้นอยู่กับจำนวนสารระเหยซึ่งมัน ไม่สามารถคำนวณหาได้ตรงๆ ดังนั้นสารระเหยที่เปลี่ยนแปลงตามการให้ความร้อน ถูกวัดภายใต้ เงื่อนไขการประเมินการใช้ประโยชน์ของเชื้อเพลิง สำหรับการวิเคราะห์แก๊สซิฟิเคชัน คาร์บอนคงตัว เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องพิจารณาในระบบแก๊สซิฟิเคชัน

2.3.2.8 ความไม่ชอบน้ำ

เป็นการศึกษาปริมาณความชื้นที่ชีวมวลดูดเข้าไป ซึ่งจะทำให้ชีวมวลเน่าสลายและผุพังได้ง่าย เมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลาานาน ๆ เมื่อนำชีวมวลมาผ่านการทอริไฟร์จะทำให้ชีวมวลมีคุณสมบัติไม่ชอบ น้ำ เนื่องจากระหว่างกระบวนการทอริไฟร์ความร้อนจะทำลาย OH-groups ที่อยู่ภายในชีวมวล ทำให้ เกิดโครงสร้างที่ไม่อึดตัว และไม่มีขี้ ทำให้ลิกนินกลายเป็นสารพลาสติกธรรมชาติที่เคลือบอยู่ในชีวมวลส่งผลให้ชีวมวลทอริไฟร์ มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ [18]

2.3.2.9 การวิเคราะห์ประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณ ความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่ง แบ่งออกได้เป็นแบบพื้นฐานเปียก (wet basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) และ แบบพื้นฐานแห้ง (dry basis) จากการอบวัสดุเชื้อเพลิงให้ความร้อนในภาชนะปิดภายใต้บรรยากาศ ของก๊าซควบคุมเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณแสดงใน ตารางที่ 8.2 ซึ่งมีข้อสังเกตคือ อัตราส่วนระหว่างสารระเหยต่อคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ประมาณ 2.5 - 3.5 เท่าสำหรับไม้ และ 2.5 - 5.2 เท่าสำหรับเศษวัสดุการเกษตร ปริมาณเถ้าในชีวมวลเศษวัสดุการเกษตร มีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวลประเภทไม้ ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆใน เชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชีวมวลแบบแยกธาตุ

ชนิด	ความชื้น (%)	สารระเหย (%)	คาร์บอนคงตัว (%)	เศษชี้เถ้า (%)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
แกลบ	8.2	58.9	19.7	13.2	14,200
ฟางข้าว	8.1	61.1	15.5	15.3	13,100
ต้นข้าวโพด	8.4	70.3	16	5.3	12,900
ซังข้าวโพด	-	-	-	2.4	16,300
ชานอ้อย	7.9	71.2	13.1	7.7	13,400
ต้นปาล์ม	48.8	38.7	11.7	1.2	7,500
เส้นใยปาล์ม	31.8	48.6	13.2	6.4	11,800
ไม้พิน	20-24	70-80	10	0.5	16,000
ขี้เลื่อย	12.3	70.5	16.4	0.8	18,000

ที่มา : หนังสือเทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล [3]

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร(พื้นฐานแห้ง)

ชนิด	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
แกลบ	38	4.7	50.2	0.4	0.1
ฟางข้าว	38.5	6.1	39.3	0.7	0.2
ต้นข้าวโพด	44.2	5.8	43.5	1.3	<0.01
ซังข้าวโพด	46.2	4.9	43.2	1.2	0.3
ชานอ้อย	44.9	5.9	40.7	0.8	<0.01
ต้นปาล์ม	43	5.6	51	0.4	<0.01
เส้นใยปาล์ม	47.2	6	36.7	1.4	0.3
ไม้พิน	51.8	5.7	40.9	0.1	<0.01
ขี้เลื่อย	50.3	5.7	41	0.2	2.7
ขยะชุมชน	63.4	10	26.1	0.4	<0.01

ที่มา : หนังสือเทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล [3]

2.4 Rotary kiln

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของ Rotary kiln

เตาเผาแบบหมุน มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว เอียงเล็กน้อย มีตัวมอเตอร์เพื่อขับให้ตัวเตาหมุนตลอดเวลา มีลักษณะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงภายในห้องเผาไหม้จึงประกอบไปด้วยวัสดุทนไฟ สามารถควบคุมระยะเวลาการเผาไหม้และปริมาณของวัตถุดิบที่จะเผาได้ จึงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์

2.4.2 ชนิดของ Rotary kiln

2.4.2.1 Wet Kilns

เตาเผาแบบเปียกมักจะถูกป้อนด้วยวัสดุละลาย เตาเผาแบบเปียกจะมีความยาวของเตาเผาอยู่ที่ 150-180 เมตร (ประมาณ 500-600 ฟุต) นอกจากนี้ยังใช้ในการทำลายก้อนวัสดุใดๆ ที่อาจอยู่

ในรูปวัสดุกำลังเปลี่ยนแปลง สถานะสารละลายไปเป็นของแข็งเมื่ออบแห้ง ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เตาเผาเหล่านี้ไม่มีประสิทธิภาพและจะถูกแทนที่ด้วยเตาเผาแบบแห้งชนิดยาว 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 Long Dry Kilns

เตาเผาเหล่านี้จะสั้นกว่าเตาเผาชนิดเปียก ที่มีความยาวในการสั่งซื้อที่ 90 – 120 เมตร (ประมาณ 300 - 400 ฟุต) สำหรับเตาเผาแบบแห้งชนิดยาว คล้ายกับเตาเผาชนิดเปียก การอบแห้ง การอุ่น และการเผาทั้งหมดเกิดขึ้นในหนึ่งภาชนะอย่างไรก็ตาม 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 Short Dry Kilns

เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้นมักจะมาพร้อม Preheater หรือ Pre-calciner ภายนอกซึ่งมันป้อนวัสดุแบบแห้งอุ่นหรือแม้กระทั่งการเผาบางส่วนก่อนที่จะเข้าเครื่องปฏิกรณ์หลัก (เตาเผา) ส่งผลให้ภาระความร้อนในเตาเผาหลักที่เหมาะสมจะลดลง ดังนั้นการติดตั้ง Preheaters หรือ Pre-calciners หรือมีแนวโน้มที่จะทำให้ขนาดของเตาเผาสั้นลง ขนาดของเตาเผาอยู่ที่ 15-75 เมตร (ประมาณ 50-250 ฟุต) ขึ้นอยู่กับการสั่งซื้อและกระบวนการที่นำไปใช้ รูปแบบการใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบของเตาเผาหินปูนและปูนขาว เนื่องมาจากขนาดอนุภาควัสดุขนาดใหญ่ที่พบในการเผาหินปูนเตาเผาปูนในปัจจุบันมีการติดตั้ง Preheaters ทาหน้าที่เป็นทางลาดเอียงของหินที่มีการไหลทวนของเตาเผา ก๊าซไอเสียมากกว่าในระบบเตาเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งเตาเผาแบบแห้งชนิดสั้นจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10



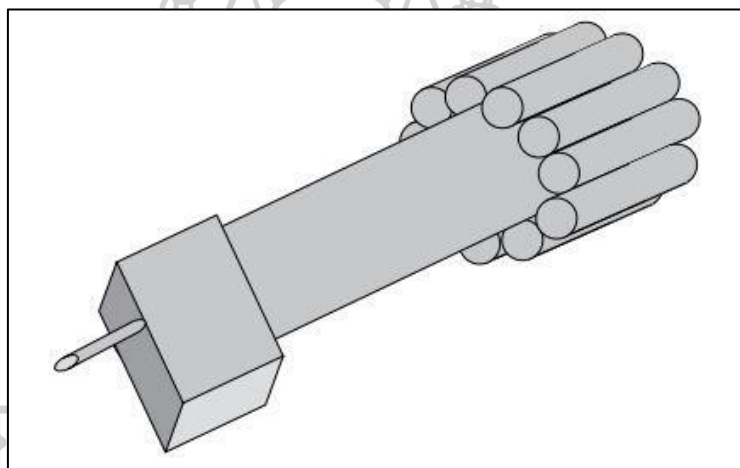
รูปที่ 2.10 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kilns)
ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.4 Cooler and Dryer Kilns

Cooler และ Dryer บางชนิดสามารถอยู่ในรูปแบบตัวสัมผัสที่ติดกับเตาเผาแบบหมุนได้โดย แม้ว่าบางอันจะมีคอนแทคบรรจุเตียงเช่นตะแกรงคูลเลอร์ คูลเลอร์แบบหมุนสามารถเป็นได้ทั้งในสายการผลิตหรือที่แนบมา จำนวนซึ่งจะถูกกำหนดโดยสูตรง่ายๆ

$$N = (\pi \times (D+d+2))/(d+1)$$

เมื่อ D และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาและ cooler ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Cooler ทาโหลตเครื่องจักรกลพิเศษที่จะต้องนำมาใช้ในการคำนวณการออกแบบ พวกเขายังมีความท้าทายในการบำรุงรักษาในปัจจุบัน เตาเผาแบบหมุนที่มี Cooler และ Dryer จะมีการติดตั้ง tumblers และ lifters ซึ่งการจับตัวของวัสดุที่ดี ซึ่งเตาเผาแบบ Cooler and Dryer จะแสดงในรูปแบบที่ 2.11



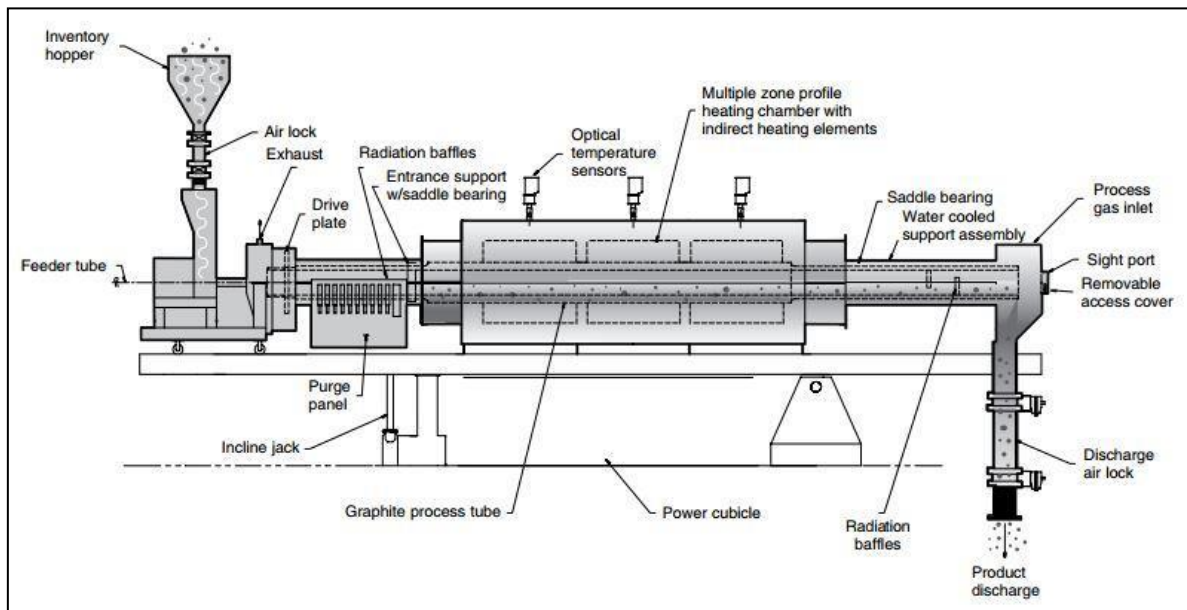
รูปที่ 2.11 เตาเผาแบบ Cooler and Dryer
ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.5 Indirect fired Kiln

เตาเผาชนิดนี้นิยมให้ความร้อนจากภายนอก มักจะได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่ติดต่อโดยตรงระหว่างวัสดุและก๊าซให้แหล่งความร้อนที่ไม่พึ่งประสงค์ ในกรณีนี้แหล่งความร้อนภายนอกเพื่อเป็นเตาเผา แก๊สไหลผ่านภายใน ที่อยู่ใน freeboard ที่ใช้สำหรับล้างการระเหยหรือก๊าซที่เกิดขึ้นจากแนวของวัสดุเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือกายภาพ เนื่องจากประสิทธิภาพของความร้อนต่ำ เตาเผาอุ่นภายนอกมีขนาดเล็ก โดยทั่วไปค่าจะเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 m (50 นิ้ว) และใช้สำหรับการใช้งานเฉพาะเช่น calcining วัสดุพิเศษ

คุณลักษณะเฉพาะของเตาเผาชนิดนี้ คือ ความหลากหลายและถูกจัดแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ควบคุมได้เป็นช่วงๆ ซึ่งสามารถให้ความร้อนโดยไฟฟ้า หรือ แก๊สร้อน ดังนั้นเตาเผาชนิดนี้สามารถให้ใน

อุณหภูมิสูง ในบางกรณี เช่น เตาเผากราฟไฟท์ที่สามารถให้อุณหภูมิถึง 2,400 องศาเซลเซียส เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดช่วงของเวลา และ ควบคุมอากาศ รวมไปถึงการควบคุมสารไวไฟ ลักษณะการใช้งานโดยทั่วไปของเตาเผาชนิดนี้ได้แก่ ปฏิกริยาการเผาไหม้ (calcination), ปฏิกริยา Reduction, ปฏิกริยาการควบคุม oxidation, ปฏิกริยา carburization, ปฏิกริยา solid-state reactions และ ปฏิกริยา purification รวมไปถึงการฟื้นฟูของเสียในขนาดเล็กที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งเตาเผาแบบ Indirect fired จะแสดงในรูปที่ 2.12 [19]



รูปที่ 2.12 เตาเผาแบบ Indirect fired

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.3 ส่วนประกอบของเตาเผา

2.4.3.1 ห้องเผา

องค์ประกอบโดยพื้นฐานของห้องเผาประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ

ส่วนเปลือกนอกเตาเผา เป็นส่วนนอกสุดของเตาเผา ทามาจากเหล็กกล้าที่ทำขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะงาน แผ่นเหล็กกล้าที่บางมีความหนาจะอยู่ในช่วง 18-25 มิลลิเมตร เป็นแผ่นรีดเย็นลักษณะโดยทั่วไปเป็นชิ้นครึ่งวงกลม เมื่อนำมาประกบกันแล้วจะทำให้เปลือกนอกมีความยาวเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ส่วนสั้นมักจะถูกประกอบที่โรงงานและการประกอบขั้นสุดท้ายที่ได้ดำเนินการในสถานที่ที่มีเตาเผาในสถานที่ ปัญหาที่พบคือ อุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาทำได้เพียง 1400 องศาเซลเซียส ขณะที่แก๊สมีอุณหภูมิถึง 1900 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้า

เพียง 1300 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าจะเริ่มอ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส จึงมีส่วนที่เป็นอิฐทนไฟหรือชั้นซีเมนต์

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

ลักษณะดังกล่าวของห้องเผายังส่งผลไปยังการออกแบบเตาเผาในส่วนของความยาว, เส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผา และมุมในการหมุนของเตาเผา รูปร่างโดยทั่วไปของเตาเผามีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 3 – 6 เมตร และความยาวของเตาเผาอยู่ตั้งแต่ 10 จนถึง 230 เมตร ตามความต้องการของผู้สั่งทำ แต่ส่วนหนึ่งที่ส่งผลต่อการออกแบบเตาเผาเป็นอย่างมากคือ มุมที่ใช้ในการหมุนเตาเผา จากงานวิจัยของ A.S. Bongo Njeng [20, 21] มุมที่เหมาะสมสำหรับการหมุนเตาเผาอยู่ที่ 2-3 องศา จะทำให้ลักษณะของวัสดุที่ออกมาจากเตาเผาที่มีค่าดีที่สุด มุมของเตาเผานอกจากนี้ส่งผลให้ค่าที่ไม่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่เฉพาะทาง

2.4.3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อนเตาเผา (Driver Gear)

เตาเผามักจะถูกขับเคลื่อนโดยลูกกลิ้งขับเคลื่อน เกียร์จะเชื่อมต่อผ่านทางโซ่เกียร์ปรับความเร็วด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า การเริ่มต้นที่สูงแรงบิดเพื่อเริ่มเตาเผาที่มีการไหลขนาดใหญ่สำหรับ 6 x 60 เมตรต้องใช้เตาเผาประมาณ 800 กิโลวัตต์ที่จะเปิด 3 รอบต่อนาที ความเร็วของการไหลของวัสดุผ่านเตาเผาเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการหมุนและอื่นๆ หากแรงบิดของมอเตอร์ไม่เพียงพอต่อการทำงานของเตาเผา ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของช่วงบนและล่างของเตาเผาได้ ดังนั้นไคโรพความเร็วจึงเป็นตัวแปรจาเป็นที่จะต้องควบคุม จากงานวิจัยของ A.S. Bongo Njeng ความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนเตาเผาอยู่ที่ 3 รอบต่อนาที วัสดุที่อยู่ภายในเตาเผาจะมีการกระจายตัวที่ดีเมื่อเทียบกับความเร็วอื่นๆ วัสดุจะมีการกระจายตัวที่ติดชั้นอิฐทนไฟ จึงทำให้ได้รับความร้อนจากเตาเผาไม่ทั่วถึง ซึ่งตรงกับการทดลองของ Anders Rooma เมื่อความเร็วรอบของการหมุนเตาเผามากขึ้น จะส่งผลให้วัตถุที่อุณหภูมิสูงและเล็กผสมกันเร็วขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้ลักษณะการนำไปใช้ ทั้งนี้ถ้าเพิ่มความเร็วขึ้น จะส่งผลให้วัสดุไหลเร็วขึ้น

2.4.3.3 แหล่งความร้อน (Heater)

การแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาเผาแบบหมุนอาจทำได้โดย การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน เรียงตามลำดับประสิทธิภาพของการให้ความร้อน ในกระบวนการที่อุณหภูมิต่ำและในส่วนที่เย็นของเตาเผาแบบยาวยังขาดส่วนของ Preheaters เพื่อให้ความร้อนแก่

วัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป ภายในเตาเผาจะมีห้องที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน เพื่อกระตุ้นให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซและวัสดุ เตาเผาอาจจะประกอบด้วย "scoop" หรือ "lifters" ที่จะจับวัสดุให้โดนกระแสก๊าซอย่างทั่วถึง

2.4.3.4 ไบกวน (lifter)

ไบกวน เป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่ติดตั้งเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุน ทาจากเหล็กกล้า ทนทานต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี รูปร่างและลักษณะของไบกวนนั้นไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความต้องการในการออกแบบและการนำไปใช้งานของผู้สั่งทำ จากงานวิจัยของ A.S. Bongo Njeng [24,25] รูปร่างของไบกวนในงานวิจัยมี 2 ลักษณะ คือ ไบกวนแบบตรง (Straight lifter) ความหนา 10 มิลลิเมตร ทามาจาก Incoloy Aolly 800 และ อีกลักษณะคือ ไบกวนแบบตั้งฉาก (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 ไบกวนทั้งสองลักษณะส่งผลที่ไม่แตกต่างกันที่สำคัญ และจากงานวิจัยของ Hong Lee [22] ได้ทำการออกแบบไบกวนมา 4 ลักษณะ นามาทดลองเพียงแค่ 3 ลักษณะ ทาการทดลองโดยติดตั้งไบกวนแต่ละแบบลงเียเตาเผาแบบหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เมตร ความยาวเตาเผา 130 เมตร ที่ความเร็วรอบ 1-2 รอบต่อนาที ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การติดตั้ง lifter ช่วยให้อายุของความร้อนระหว่างวัสดุกับแก๊สร้อนนั้นดีขึ้น และทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้นั้นกระจายตัวตามแนวแกนได้ดีขึ้นอีกด้วย

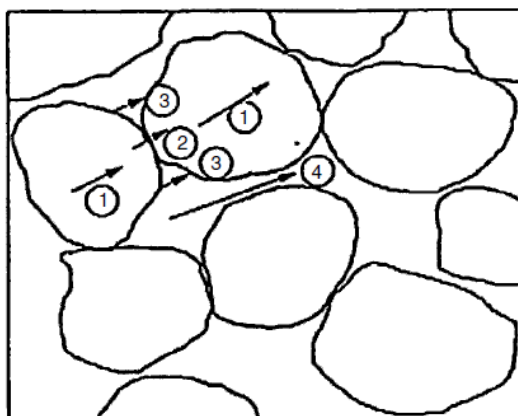
2.5 การใช้งาน Rotary kiln

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

การประยุกต์ใช้เตาเผาแบบหมุนอีกแบบคือใช้สำหรับการเผาของเสีย เตาเผาแบบหมุนเป็นที่นิยมสำหรับงานนี้เนื่องจากความยืดหยุ่นของเตา มันสามารถที่จะจัดการกับวัสดุหลากหลายที่ป้อนเข้าไปกับค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงและไม่เป็นปัญหาเรื่องการกำจัดของเสียที่เป็นของแข็งที่ทางออก[23]

2.6 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาแบบหมุน

ระหว่างกระบวนการทางความร้อนของวัสดุขนาดเล็กในเตาเผาแบบหมุนการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในชั้นวัสดุ เกิดขึ้นโดยกลไกที่เหมือนกันในหลายกลุ่มชั้นวัสดุ เส้นทางการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่าง อนุภาค กับ อนุภาค จะเป็นการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนตลอดจนช่องแคบเล็ก ๆ ระหว่าง แก๊สกับอนุภาค จะเป็นการพาความร้อนดังแสดงในรูป 2.13

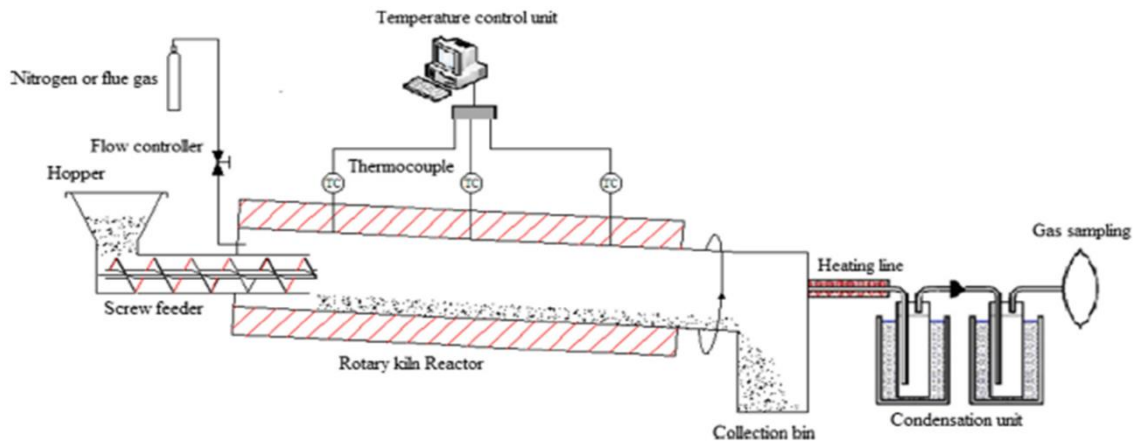


- รูปที่ 2.13 เส้นทางการแลกเปลี่ยนความร้อนของชั้นวัสดุ
1. การนำความร้อนภายใน
 2. การนำความร้อนระหว่างอนุภาคกับอนุภาค
 3. การแผ่รังสีความร้อนระหว่างอนุภาค กับ อนุภาค
 4. การพาความร้อนผ่านช่องแคบเล็ก ๆ

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

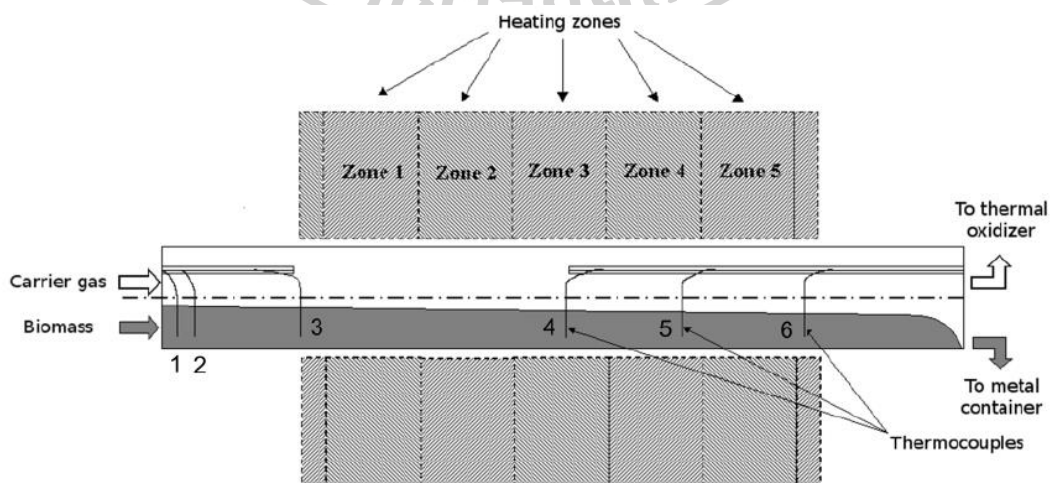
2.7 Rotary kiln torrefaction

Yanyang Mei a. et.al., (2014) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟคชัน ของไม้ซีดาร์จะดำเนินการในเตาเผาแบบหมุนขนาดกึ่งห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิต่างกัน (200, 230, 260 และ 290 องศาเซลเซียส) การ ทอรีแฟคชัน มีผลต่อคุณสมบัติเกี่ยวกับ grindability, hygroscopicity ซึ่งจะถูกพิสูจน์และลงรายละเอียดรวมถึงการเผาไหม้ด้วย แต่มันกลับกลายเป็นว่าสามารถเทียบได้กับชีวมวลดิบในเรื่องของ grindability, hygroscopicity มันมีการปรับปรุง การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันส่งผลให้เกิดการลดลงของ grindability การใช้พลังงาน การใช้ก๊าซไอเสียอุตสาหกรรมมีความสำคัญ และมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของไม้ซีดาร์ระหว่างทอรีแฟคชันกับคุณสมบัติของผลผลิต เพื่อเพิ่มความหนาแน่นพลังงานและผลผลิต , อุณหภูมิของการทอรีแฟคชัน ควรควบคุมภายใน 260 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเผาไหม้ของ torrefied ตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นการเผาไหม้ของถ่านที่มีลักษณะคล้ายกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากถ่านลิกไนต์[24]



รูปที่ 2.14 รูปการออกแบบของระบบเตาทอรีแฟคชันแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการ

Jean-Louis Dirion et.al., (2014) ได้ศึกษาการทอรีแฟคชัน beech chips ในเตาเผาแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการ ผลกระทบของตัวแปรในการทำงาน - อุณหภูมิ, ระยะเวลาดำเนินงาน และ ปริมาณของแข็ง บน อุณหภูมิของชั้นวัสดุของแข็งตามเตาเผาและผลได้เชิงมวลของกระบวนการถูกประเมินค่า มันถูกตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิหรือระยะเวลาดำเนินการที่นำไปสู่การลดลงของผลได้เชิงมวลของกระบวนการ นอกจากนี้มันมีหลักฐานแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณของแข็ง ที่ การลดลงของผลได้เชิงมวลเหมือนกัน การศึกษาอุณหภูมิตามเตาเผา มีการเปิดใช้งานเพื่อค้นหา โซนอบแห้ง โซนทอรีแฟคชัน การทอรีแฟคชันเริ่มต้นในจุดสุดท้ายที่สามของโซนให้ความร้อน นอกจากนี้ยังถูกตั้งข้อสังเกตว่า ปริมาณของแข็ง เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดความร้อนซ้ำของชีวมวล ในด้านอื่นๆ สำหรับอุณหภูมิที่สูงหรือ ปริมาณของแข็งที่มาก อุณหภูมิของชีวมวลจะเกินกว่าอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งหลักฐานที่เกิดขึ้นเกิดจากของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดความร้อนขึ้น [25]



รูปที่ 2.15 รูปแสดงแผนผังเตาทอรีแฟคชันแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีไฟรด้วยเตาเผาแบบหมุน พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลของตัวแปรต่อกระบวนการทอรีไฟรที่มีผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

ในการวิจัยและการทดลองมีเครื่องมือที่ใช้สำหรับงานวิจัยแบ่งออกเป็น อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวลสำหรับทอรีไฟร อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนแก่เตาเผาแบบหมุน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวลสำหรับทอรีไฟร

3.1.1.1 เครื่องสับหยาบ

เครื่องสับหยาบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดขนาดชีวมวลให้มีขนาดเล็กลงโดยชีวมวลที่ผ่านเครื่องสับหยาบจะมีขนาดในช่วง 1-5 เซนติเมตร กำลังการผลิต 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เครื่องสับหยาบที่ใช้งานแสดงดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องสับหยาบ

3.1.1.2 เครื่องสับละเอียด

เครื่องสับละเอียดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมชีวมวลดิบโดยการย่อยชีวมวลดิบที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม เพื่อให้มีขนาดตามที่ต้องการกำลังการผลิต 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมงซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยภายในเครื่องสับละเอียดจะมีตะแกรงขนาดต่างๆ เช่น 2 , 5 และ 9 มิลลิเมตร

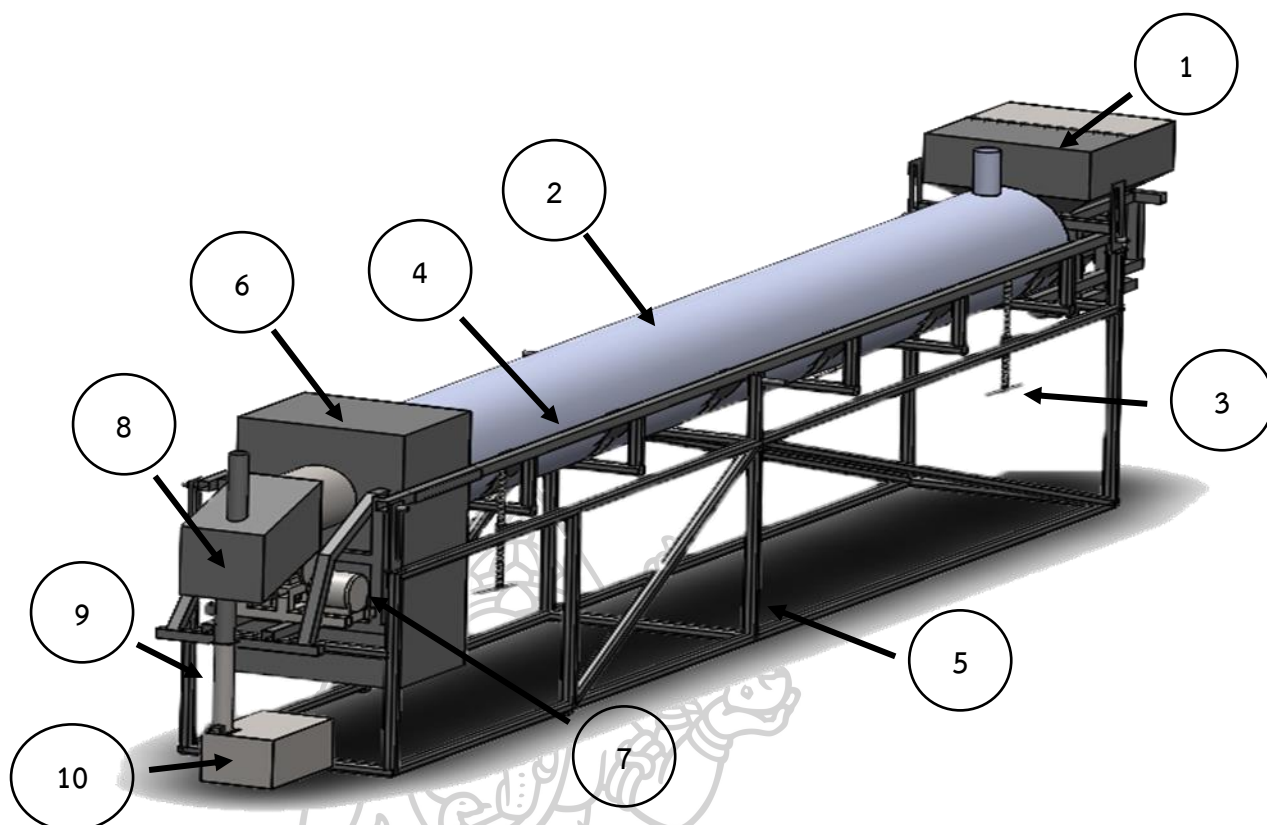


รูปที่ 3.2 เครื่องสับละเอียด

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เตาดเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

เตาดเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ส่วนประกอบของเตาเผาแบบหมุน

1. ฮอปเปอร์: เป็นส่วนบรรจุชีวมวลดิบก่อนเข้ากระบวนการทอรีแฟคชั่นภายในเตามีขนาดเท่ากับ $0.7 \times 0.7 \times 0.8$ เมตร ประกอบติดด้วยสกรูล้ำเลียงขนาด 3 นิ้ว ยาว 0.5 เมตร เพื่อป้อนชีวมวลดิบเข้าสู่ภายในเตาขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ $1/8$ แรงม้าส่งกำลังผ่านชุดโซ่และเฟือง
2. ถัง 200 ลิตร: ทำหน้าที่เป็นส่วนกักเก็บความร้อนต่อกันจำนวน 6 ถัง ความยาวรวม 5.2 เมตร ภายในบุด้วยฉนวนเซรามิกไฟเบอร์เพื่อกันความร้อนออกทางผิวของถัง และใส่ล้อขนาด 3 นิ้ว เพื่อรองรับท่อ 12 นิ้วภายใน
3. พาวเวอร์สกรู: เป็นเพลาดันขนาด 1 นิ้ว กลึงเกลียวเหลี่ยม ทำหน้าที่รองรับฐานส่วนกักเก็บความร้อน จำนวน 4 จุด และทำหน้าที่ช่วยในการปรับมุมของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดโรตารี
4. ฐานรองรับส่วนกักเก็บความร้อน: เป็นฐานรองรับส่วนกักเก็บความร้อนรวมถึงส่วนให้ความร้อน สามารถปรับมุมเอียงได้ $1 - 5$ องศา ขนาดความกว้าง 0.81 เมตร ยาว 6.0 เมตร และสูง 0.4 เมตร ใช้เหล็กขนาด 2×2 นิ้ว
5. โครงสร้างฐาน: ส่วนรองรับทั้งหมดของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดโรตารี ขนาดกว้าง 0.9 เมตร ยาว 6.0 เมตร และสูง 1.3 เมตร ใช้เหล็กขนาด 2×2 นิ้ว

6. ส่วนให้ความร้อน: เป็นส่วนที่ป้อนชีวมวลอัดก้อนเพื่อเป็นเชื้อเพลิงขนาดกว้าง 0.55 เมตร ยาว 0.8 เมตร และสูง 1.3 เมตร มีท่อขนาด 4 นิ้วจำนวน 6 ท่อเป็นส่วนป้อนชีวมวลอัดก้อน ด้านตรงข้ามมีถาดเก็บขี้เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

7. ระบบขับเคลื่อน: ประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ชุดเกียร์ทดรอบอัตราทด 1:60 และเฟืองขนาด 1.5 6 และ 7 นิ้ว เป็นตัวส่งกำลังไปยังโซ่ที่ล้อมรอบเตาเผา (ท่อ12นิ้ว)

8. ทางออกชีวมวล: เป็นส่วนที่รองรับชีวมวลทอริไฟร์ที่ออกมาจากเตาเผาและมีท่อที่ไว้ระบายไอของสารระเหยต่างๆของชีวมวลทอริไฟร์ มีลักษณะเป็น 4 เหลี่ยมด้านเท่า ขนาดกว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.5 เมตร สูง 0.35 เมตร

9. ท่อลำเลียงชีวมวล: เป็นทางผ่านชีวมวลก่อนลงสู่กล่องบรรจุชีวมวล ขนาด 4 นิ้ว

10. กล่องบรรจุชีวมวล: เป็นกล่องเก็บชีวมวลทอริไฟร์ ขนาด กว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.5 เมตร สูง 0.25 เมตร เจาะรูขนาด 3 นิ้วเพื่อเป่าทางเข้าของชีวมวลทอริไฟร์ที่ผ่านมาจากท่อลำเลียงชีวมวล

3.1.2.2 แหล่งให้ความร้อน

แก๊สปิโตเลียมเหลว ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนกับเตาเผาแบบหมุนโดยหัวเตาแก๊สจะถูกติดตั้งอยู่ภายในห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนแก่เตาเผาแบบหมุน โดยหัวเตาแก๊สและแก๊สปิโตเลียมเหลวจะแสดงดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แหล่งความร้อนของเตาเผาแบบหมุน

3.1.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

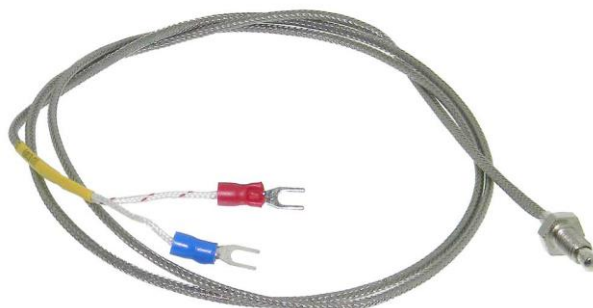
Data logger (midi LOGGER GL820) ใช้บันทึกข้อมูลของอุณหภูมิในจุดต่างๆของเตาโดยผ่านสายเทอร์โมคัปเปิล โดยในรุ่น midi LOGGER GL820 มีความถี่ในการเก็บข้อมูลได้ตั้งแต่ 10ms – 1 hr ต่อ 1 ตัวอย่างข้อมูล เมื่อใช้คู่กับ เทอร์โมคัปเปิล type K จะได้ช่วงอุณหภูมิในการวัดอยู่ที่ 100 - 1370 °C มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 0.05\%$ ดังแสดงในรูป 3.5



รูปที่ 3.4 Data logger (midi LOGGER GL820)

3.1.2.4 สายเทอร์โมคัปเปิล

เป็นสายสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ โดยสายเทอร์โมคัปเปิลทำจากส่วนประกอบของวัสดุ Chromel – Alomel เป็นที่นิยมใช้งาน ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ออุณหภูมิอยู่ที่ $(41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$ เหมาะสำหรับงานวัดอุณหภูมิด้านกลางๆ ถึงสูง โดยมีย่านการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -200°C ถึง $+1350^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.5 สายเทอร์โมคัปเปิล type K

3.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมเชื้อเพลิงและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

สำหรับระยะเวลางานวิจัย ช่วงแรกจะทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการทอรีแพคชั่นตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2559 จากนั้นเริ่มทำการทดลองใช้เตาเผาแบบหมุน เริ่มทำการทดลองและเก็บผลการทดลองตั้งแต่เดือนตุลาคม 2559 จนถึงเดือนเมษายน 2560 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองตั้งแต่เดือนพฤษภาคมเป็นต้นไป ซึ่งระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยจะแสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัย

รายงานการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัย
- ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการทอรีแพคชั่น	สิงหาคม – กันยายน 2559
- ทดลองใช้เตาเผาแบบหมุนและศึกษาตัวแปรของการทดลอง	ตุลาคม – ธันวาคม 2559
- เริ่มทำการทดลองและเก็บข้อมูลการทดลอง	มกราคม - มิถุนายน 2560
- วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง	กรกฎาคม – ธันวาคม 2560
- สรุป อภิปรายผลการทดลอง และเขียนรายงานวิจัย	มกราคม – พฤษภาคม 2561

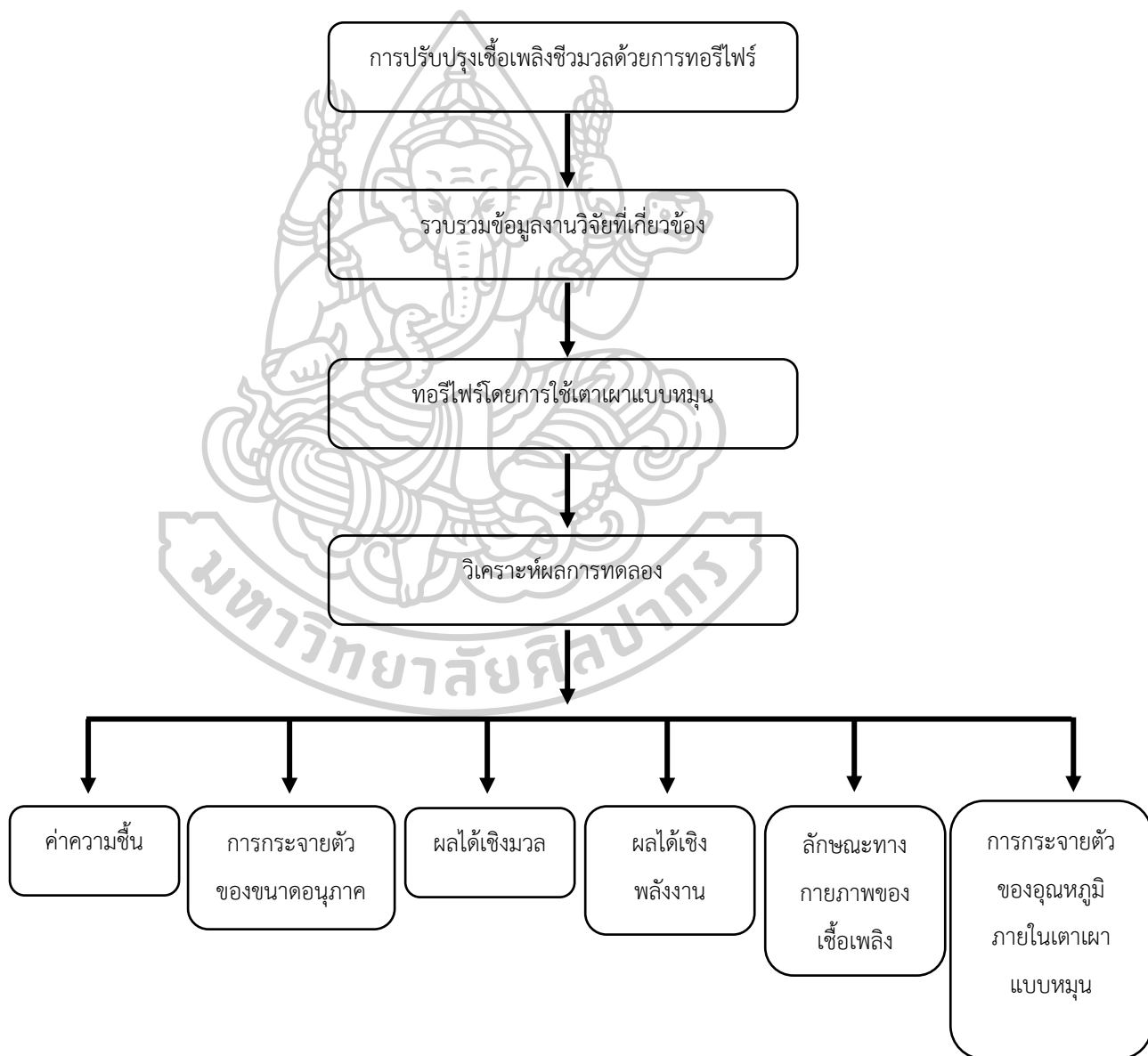
3.4 งบประมาณการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้งบประมาณเพื่อดำเนินการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนเงินโดยประมาณ 200,000 บาท โดยได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.5 การวางแผนการวิจัย

3.5.1 แผนการดำเนินงาน

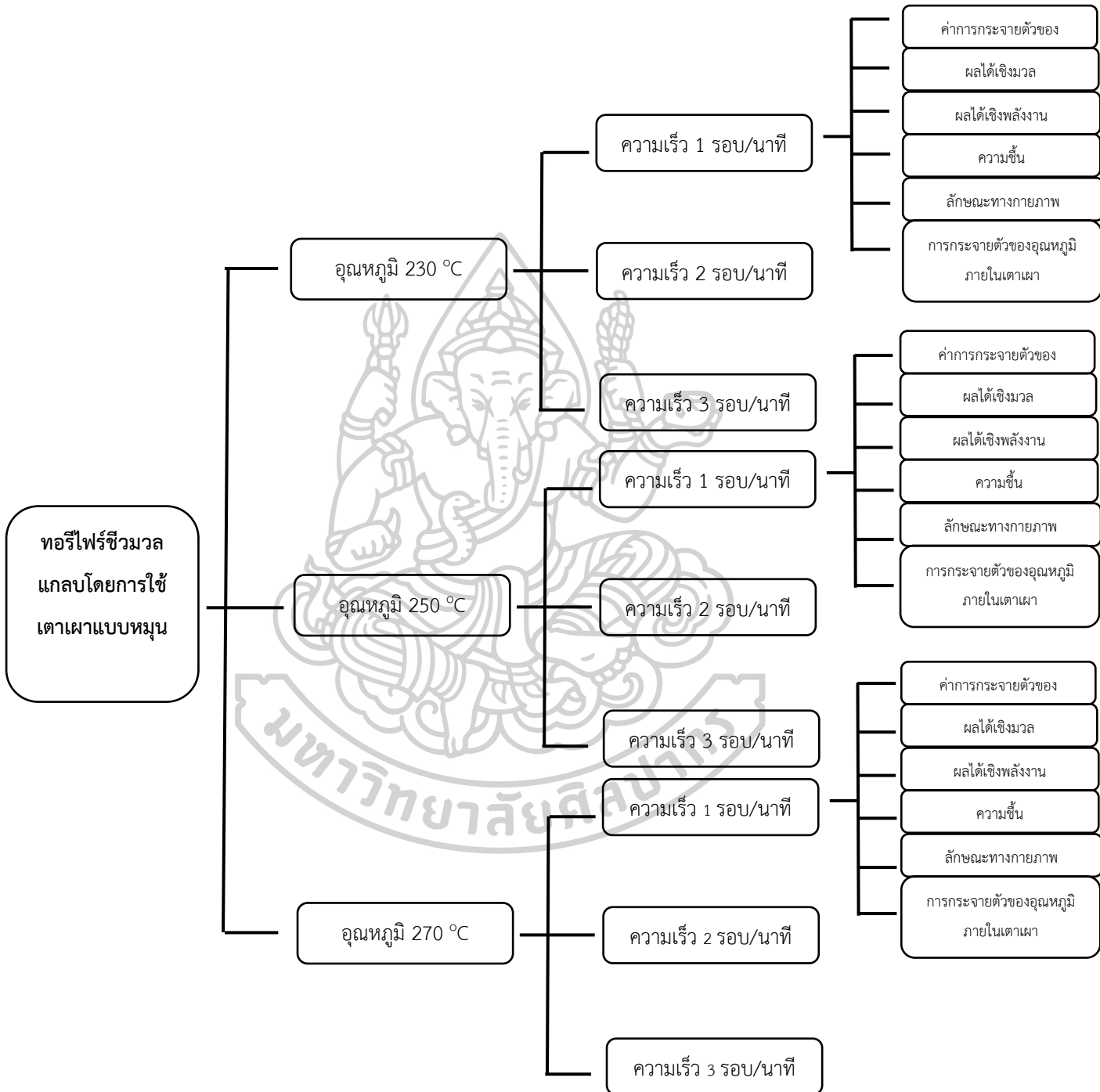
แผนการวิจัยในการศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเตาเผาชีวมวลแบบหมุนในส่วนของ การกระจายตัวของอนุกรมุมิภายในเตาเผาแบบหมุน และโปรไฟล์อุณหภูมิของเตาเผาแบบหมุน และเชื้อเพลิงชีวมวล โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกรับปรุงโดยการทอรีไฟร์ จากนั้นจะถูกทดสอบคุณสมบัติ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงทอรีไฟร์ ค่าความชื้น ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ค่าผลได้เชิงมวล ค่าผลได้เชิงพลังงาน ซึ่งแสดงดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 รูปแสดงแผนการวิจัยการปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการทอรีไฟร์
โดยใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln)

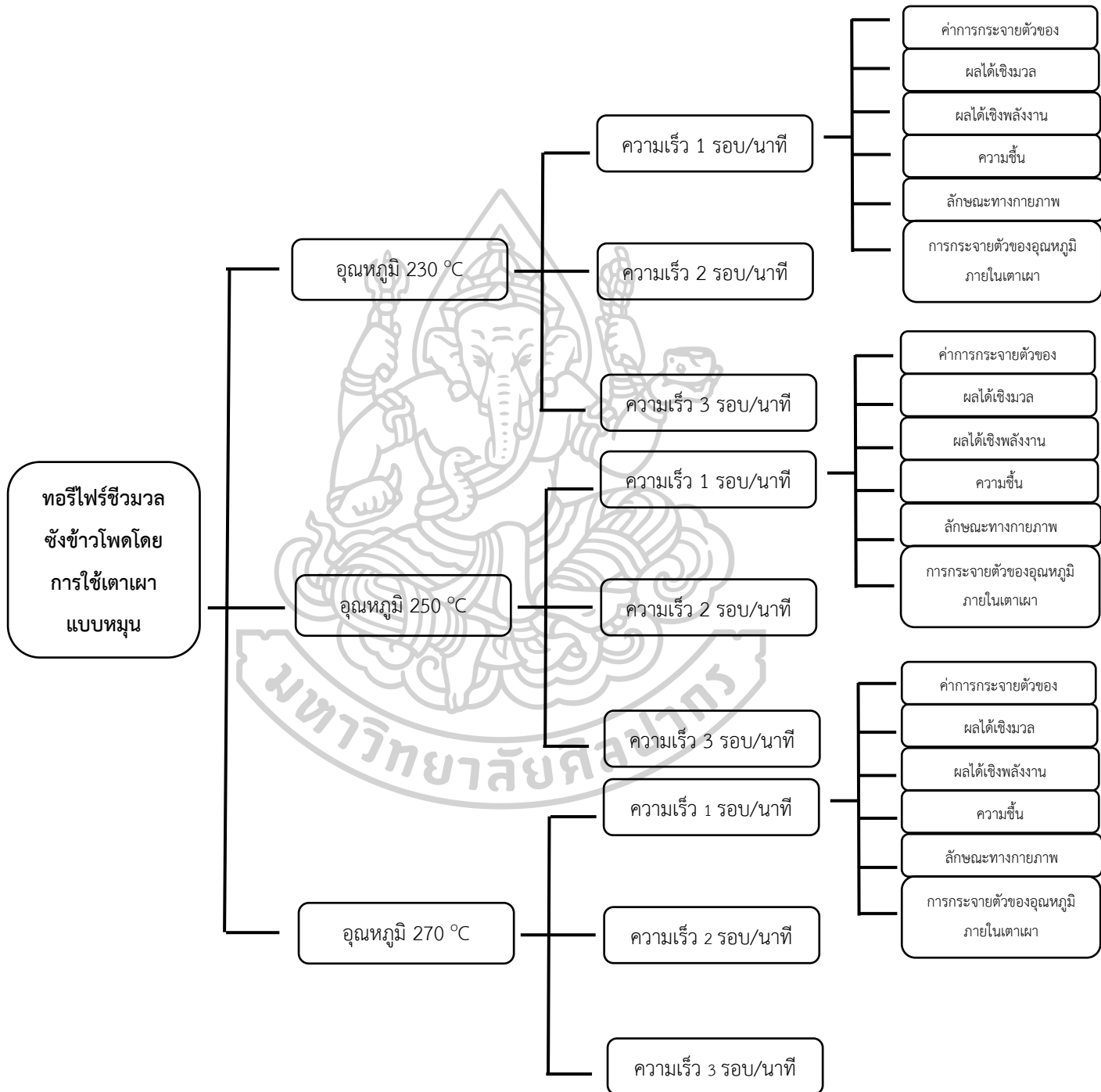
3.5.2 แผนการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้ชีวมวลในการทอรีไฟร์ทั้งสิ้นจำนวน 2 ชนิดได้แก่ แกลบ และ ชั่งข้าวโพด



รูปที่ 3.7 รูปแสดงแผนการทดลองการปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวมวลฟางข้าวโดยการทอรีไฟร์ด้วยเตาเผาแบบหมุน

จากแผนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซิวมวลที่ใช้ในการทดลองคือแกลบ ซึ่งจะถูกทดลองที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียสที่ 3 ความเร็วรอบคือ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอริไฟร์มาทดสอบมาตรฐาน



รูปที่ 3.8 รูปแสดงแผนการทดลองการปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวมวลซังข้าวโพดโดยการทอริไฟร์ด้วยเตาเผาแบบหมุน

จากแผนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.8 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือซังข้าวโพด ซึ่งจะถูกลดลงที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียสที่ 3 ความเร็วรอบคือ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอรีไฟร์มาทดสอบมาตรฐาน

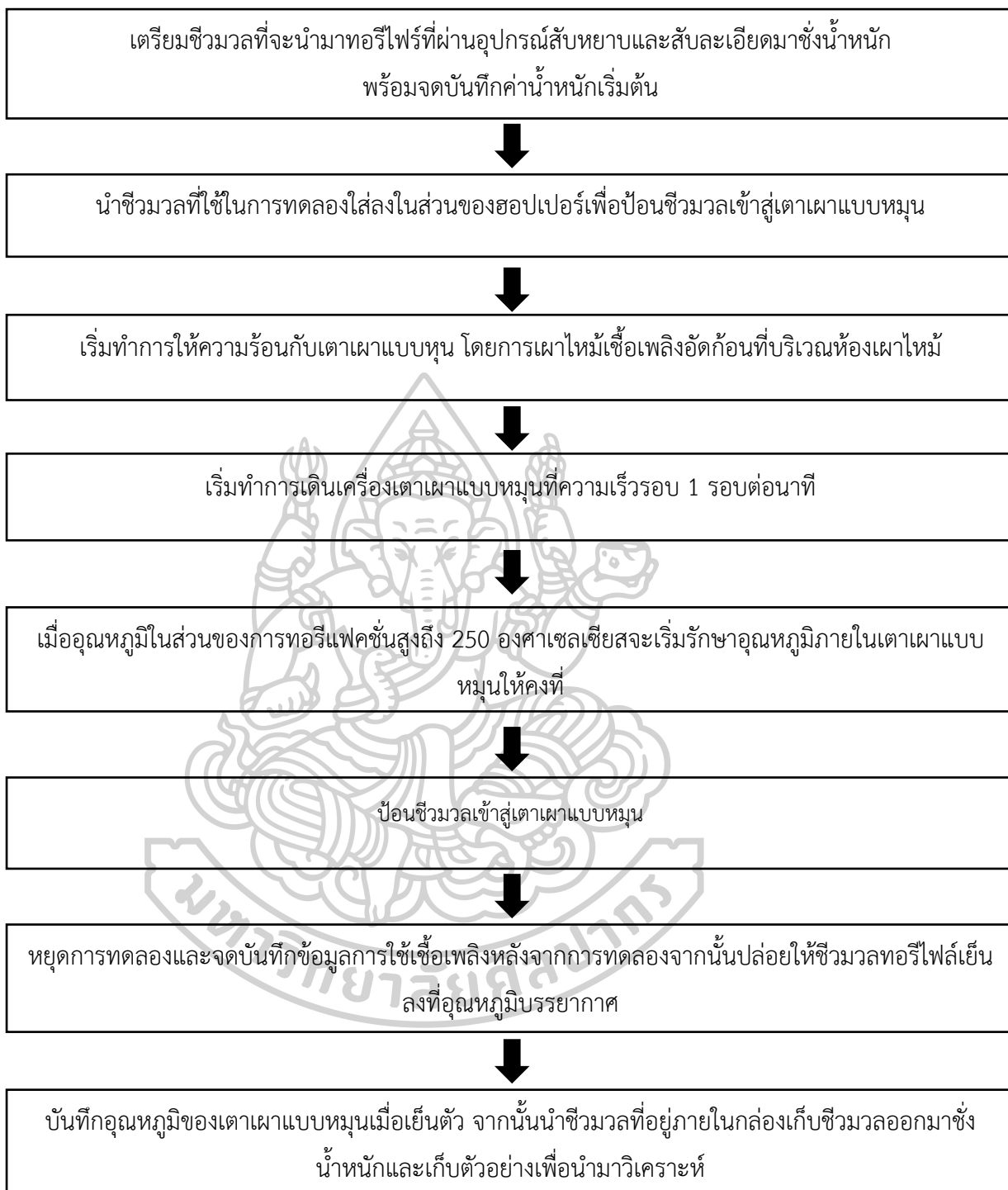
ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลอง

ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น	ความเร็วรอบในการหมุนเตาเผา	จำนวนการทดลอง
แกลบ	3	3	9
ซังข้าวโพด	3	3	9
จำนวนการทดลองทั้งหมด			18

จากตารางที่ 3.2 สรุปจำนวนของการทดลองทั้งหมด ซึ่งสรุปได้ว่าแต่ละชีวมวลจะใช้เวลาในการทดลอง 9 การทดลอง สำหรับทุกชีวมวลในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้เท่ากับ 18 การทดลอง

3.6 วิธีการทดลอง

จากรูป 3.9 แสดงถึงขั้นตอนวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้ ซึ่งในการทดลองนั้นจะกำหนดอุณหภูมิทั้งหมด 3 ค่า (230 250 และ 270 องศาเซลเซียส) และความเร็วรอบของการหมุนเตาจำนวน 3 ค่า (1 2 และ 3 รอบต่อนาที) ซึ่งในที่นี้จะอธิบายการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนเตา 1 รอบต่อนาที ดังต่อไปนี้ เตรียมชีวมวลที่จะนำมาทอรีไฟร์ที่ผ่านอุปกรณ์สับหยาบและสับละเอียดมาซึ่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น นำชีวมวลที่ใช้ในการทดลองใส่ลงในส่วนของฮอปเปอร์เพื่อป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน เริ่มทำการให้ความร้อนกับเตาเผาแบบหมุน โดยใช้แก๊สปิโตเลียมเหลวเป็นแหล่งความร้อน โดยให้ความร้อนที่บริเวณห้องเผาไหม้จากนั้นเริ่มทำการเดินเครื่องเตาเผาแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิในส่วนของการทอรีแฟคชั่นสูงถึง 250 องศาเซลเซียสจะเริ่มรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนให้คงที่และป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองครบตามระยะเวลาที่กำหนดไว้จากนั้นหยุดการทดลองและจดบันทึกข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงหลังจากการทดลองจากนั้นปล่อยให้ชีวมวลทอรีไฟล์เย็นลง ณ อุณหภูมิปกติและบันทึกอุณหภูมิของเตาเผาแบบหมุนเมื่อเย็นตัว หลังจากนั้นนำชีวมวลที่อยู่ภายในกล่องเก็บชีวมวลออกมาซึ่งน้ำหนักและเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทดลอง

3.7 การวิเคราะห์ผล

3.7.1 ค่าความร้อน

การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่แท้จริง ได้ดังสมการ

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (1)$$

- เมื่อ
- a คือ เวลาของการจุดระเบิด
 - b คือ เวลาเมื่ออุณหภูมิถึง 60% ของที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด
 - c คือ เวลาที่เริ่มต้นของคาบ (หลังจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น)ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลายเป็นคงที่
- อุณหภูมิกลายเป็นคงที่
- t คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ถูกต้อง (องศาเซลเซียส)
 - t_c คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่อ่านได้
 - t_a คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ที่เวลาจุดระเบิด
 - r_1 คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาทีก่อนจุดระเบิด
 - r_2 คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาทีหลังจากเวลาที่เริ่มต้นของคาบ c

ค่าความร้อนกรอสของการเผาไหม้

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (2)$$

- เมื่อ
- H_g คือ ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้ (จูลต่อกรัม)
 - W คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
 - m คือ มวลของตัวอย่างเป็น (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 สายฟิวนิคเกิลโครม)

ค่ามาตรฐานแคลอริมิเตอร์

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_3}{t} \quad (3)$$

- เมื่อ W คือ ค่าความจุความร้อนของบอมแคลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
 H คือ Heat of combustion of Standard benzoic acid (ให้พลังงาน 6318 แคลอรีต่อกรัม)
 m คือ มวลของตัวอย่างเป็นกรัม
 t คือ ผลรวมของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)
 e₁ คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ (HNO₃) 23.9 แคลอรี
 e₃ คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)

3.7.2 ค่าความชื้น

ค่าความชื้นสามารถหาได้จากสมการ

$$M\% = \frac{W_0 - W_f}{W_0} \quad (4)$$

- เมื่อ W₀ คือ น้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิง (กรัม)
 W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของเชื้อเพลิง (กรัม)
 M คือ ความชื้นเปียก (เปอร์เซ็นต์)

3.7.3 ค่าผลได้เชิงมวล

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Y_m = \frac{M_t}{M_r} \times 100\% \quad (5)$$

- เมื่อ Y_m คือ ผลได้เชิงมวล (เปอร์เซ็นต์)
 M_t คือ มวลของชีวมวลทอริไฟร์ (กิโลกรัม)
 M_r คือ มวลของชีวมวลดิบเริ่มต้น (กิโลกรัม)

3.7.4 ผลได้เชิงพลังงาน

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Y_e = \frac{HHV_T}{HHV_r} \times Y_m \quad (6)$$

เมื่อ Y_e คือ ผลได้เชิงพลังงาน (เปอเซ็นต์)

HHV_t คือ ค่าความร้อนของชีวมวลทอริไฟร์ (กิโลจูล/กิโลกรัม)

HHV_r คือ ค่าความร้อนของชีวมวลดิบเริ่มต้น (กิโลจูล/กิโลกรัม)



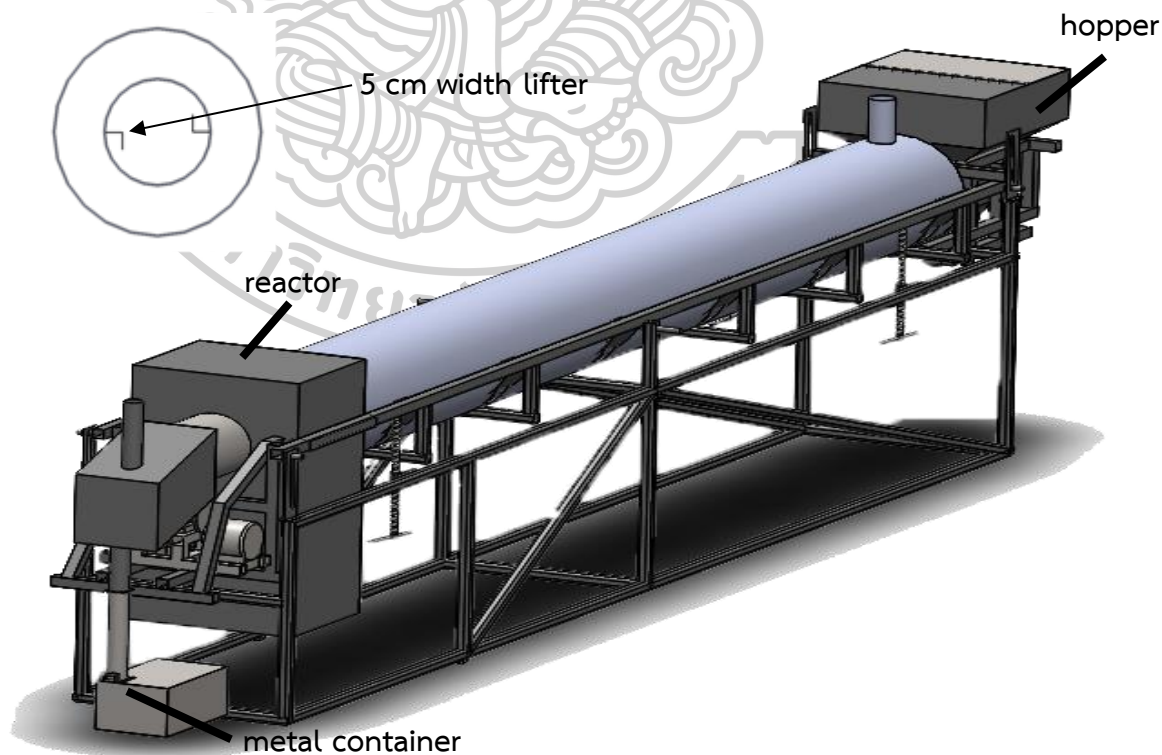
บทที่ 4

สรุปผลและอภิปรายผล

จากการทดลอง เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเตาเผาแบบหมุน ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา ค่าความชื้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน ของชีวมวลทอรีไฟร์ ที่ความเร็วรอบเตาเผา 1 2 และ 3 รอบต่อนาที (rpm) และที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส สามารถอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

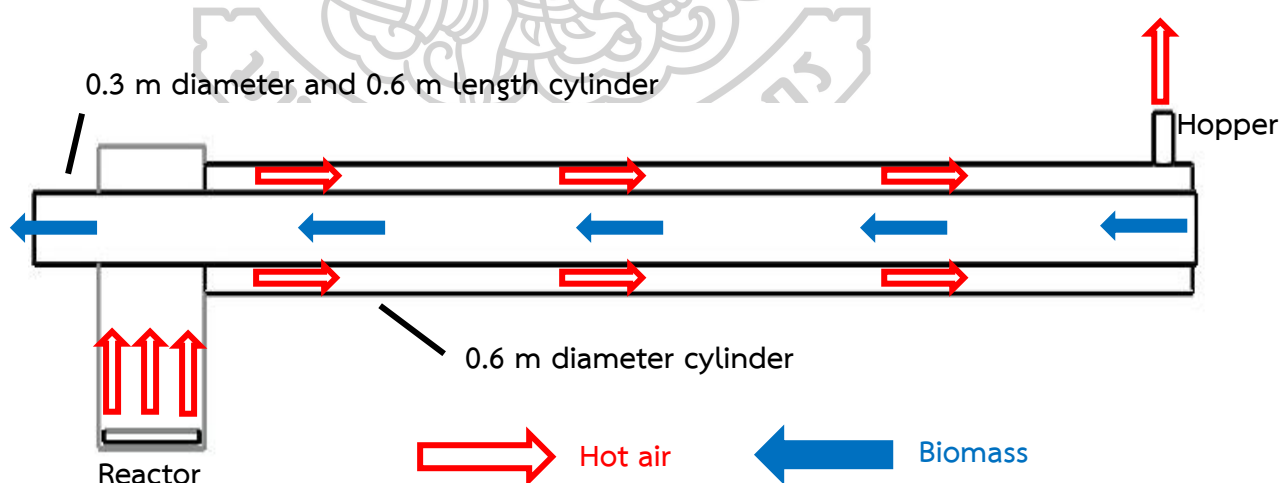
4.1 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบและสร้างเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยเตาเผาแบบหมุนที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลได้ โดยรูปของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันจะแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้อธิบายส่วนประกอบเบื้องต้นของเตาเผาแบบหมุนไว้แล้วในรูปที่ 3.3



รูปที่ 4.1 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงชีวมวล

เตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 เมตร ยาว 6 เมตร โดยจะมีใบกวนรูปตัว L จำนวน 2 ใบติดตั้งอยู่ภายในท่อทรงกระบอก โดยภายนอกของเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กลักษณะนั้นจะถูกคลุมด้วยท่อทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ความเร็วรอบของเตาเผาแบบหมุนนั้นสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 1 รอบต่อนาที จนถึง 3 รอบต่อนาที และมุมเอียงของเตาเผาแบบหมุนมีค่าตั้งแต่ 1 องศา จนถึง 5 องศา ฮอปเปอร์ได้ถูกนำมาใช้สำหรับลำเลียงชีวมวลเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ได้ถูกติดตั้งตามจุดต่างๆภายในเตาเผาแบบหมุนเพื่อใช้สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุน ห้องเผาไหม้ได้ถูกติดตั้งไว้ในส่วนท้ายของเตาเผาแบบหมุน แก๊สปิโตเลียมเหลว (LPG) ได้ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาแบบหมุน ชีวมวลภายในเตาเผาแบบหมุนและอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้จะไหลแบบสวนทางกัน อากาศร้อนกับชีวมวลภายในเตาเผาจะไม่สัมผัสกัน (เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ซึ่งรูปของการไหลระหว่างชีวมวลและอากาศร้อนจะแสดงดังรูปที่ 4.2 อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะถูกเร่งจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้คือ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียสโดยที่อัตราการให้ความร้อนแก่เตาเผาอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาคงที่ ชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาผ่านทางฮอปเปอร์ ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนภายในเตาเผาแบบหมุน หลังจากที่ชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันแล้ว ชีวมวลจะไหลเข้าสู่ภายในถังเก็บชีวมวล โดยถังเก็บชีวมวลจะเป็นถังปิดเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างที่รอให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันเย็นตัวลง



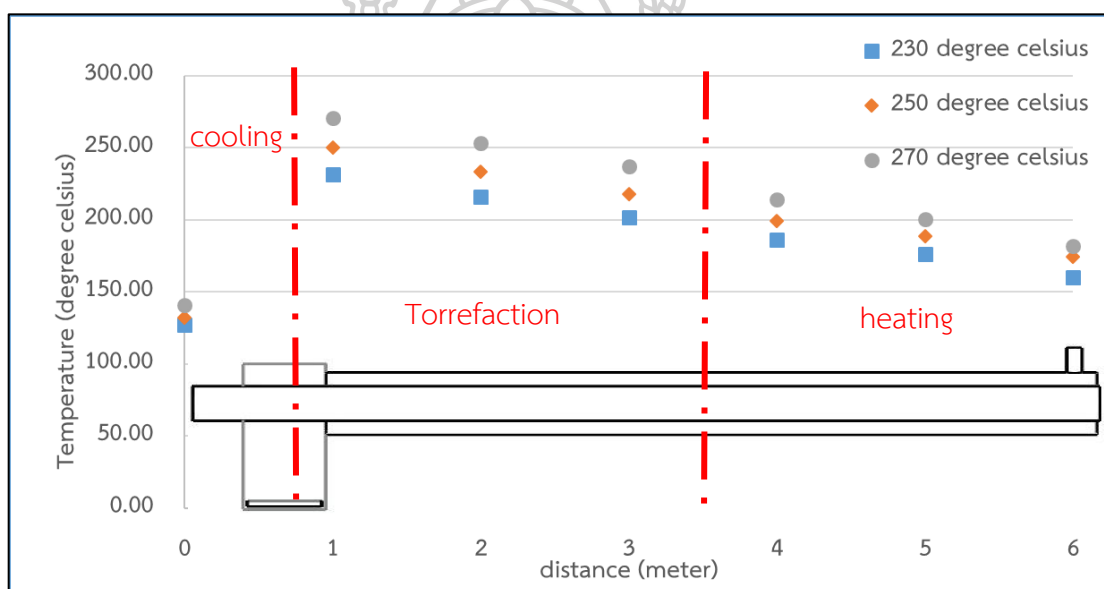
รูปที่ 4.2 การไหลของชีวมวลและอากาศร้อนภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงชีวมวล

4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.3 แสดงถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่สภาวะคงตัว โดยจากรูปนั้นจะเป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาในช่วงที่อุณหภูมิคงตัวหลังจากทำการเร่งอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ใช้สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่ ระยะต่างๆนั้นจะแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยจากรูปจะเห็นว่าเมื่อระยะของเตานั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง ทำให้สามารถที่จะแบ่งช่วงของเตาเผาแบบหมุนออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงไล่ความชื้น ช่วงทอรีแฟคชั่น และช่วงที่ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิบรรยากาศ โดยในช่วงไล่ความชื้นของชีวมวลนั้นจะอยู่ในช่วง 100-200 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำนั้นมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลให้น้ำในชีวมวลนั้นเกิดการเดือดและระเหยออกจากชีวมวลดิบ เป็นผลให้ความชื้นและปริมาณน้ำภายในชีวมวลนั้นลดลง โดยจากรูปที่แสดงนั้นจะเห็นว่าในช่วงระยะ 3-6 เมตรนั้นจะเป็นช่วงที่ไล่ความชื้นของกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็ก ช่วงที่สองช่วงทอรีแฟคชั่น เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิอยู่ภายในช่วง 200-300 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิในช่วงทอรีแฟคชั่นนั้นจะเป็นช่วงที่ชีวมวลนั้นเกิดปฏิกิริยา ดีไฮเดรชัน ดีไฮดรอกซิเลชัน และปฏิกิริยา ดีคาบอซิเลชัน โดยจากในรูปอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงทอรีแฟคชั่นอยู่ที่ 231.63, 250.01 และ 270.42 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยอ้างอิงจากระยะ 1 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณห้องเผาไหม้ที่มี LPG เป็นแหล่งให้ความร้อนของกระบวนการ ช่วงที่ 3 คือช่วงที่ทำให้ชีวมวลเย็นลงที่บรรยากาศ โดยในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ชีวมวลไหลออกจากเตาเผาเข้าสู่ถังบรรจุชีวมวล โดยที่ถังบรรจุชีวมวลนั้นจะเป็นภาชนะปิดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยจากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็ก จะลดลงไปตามระยะที่เพิ่มขึ้นของเตาเผาแบบหมุนโดยที่อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ระยะ 1 เมตรซึ่งเป็นบริเวณที่ห้องเผาไหม้ติดตั้งอยู่

ตารางที่ 4.1 ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนที่สภาวะคงตัว

ระยะ (เมตร)	ขาออก ชีวมวล	จุดอ้างอิง อุณหภูมิทอริไฟร์	2	3	4	5	ขาเข้า ชีวมวล
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	126.99	231.63	215.61	201.78	185.83	176.20	160.10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	131.83	250.01	233.18	217.78	199.38	188.56	174.18
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	140.84	270.56	253.42	236.72	214.05	200.03	181.66

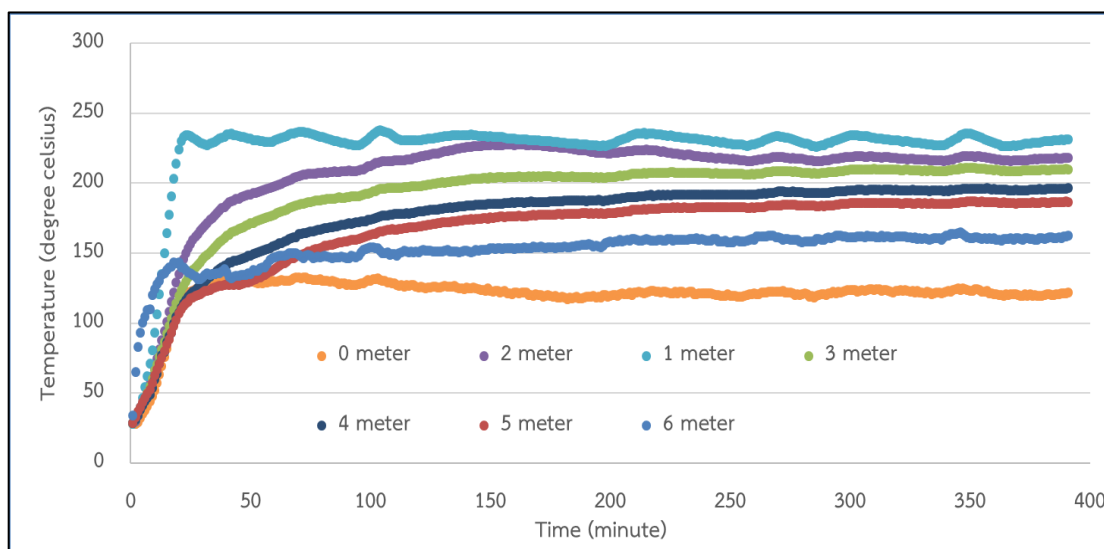


รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอริแฟคชัน

4.3 โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอริแฟคชัน

รูปที่ 4.4 แสดงถึงแสดงถึง โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอริแฟคชัน โดยในรูปจะแสดงถึงการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนตลอดทั้งกระบวนการทอริแฟคชัน โดยจุดที่ใช้อ้างอิงอุณหภูมิของกระบวนการทอริแฟคชันนั้นคือที่ระยะ 1 เมตร ในช่วงเริ่มการทดลองนั้นจะทำการเร่งอุณหภูมิจากอุณหภูมิบรรยากาศให้ขึ้นไปถึงอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชัน คือ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 20 นาที

หลังจากนั้นจะทำการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันให้อยู่ภายในช่วง ± 5 องศาเซลเซียส จบสิ้นสุดกระบวนการ โดยที่อุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนนั้นจะลดลงตามระยะที่เพิ่มขึ้นของเตาเผาแบบหมุนโดยที่ 0 เมตรจะเป็นจุดที่ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันไหลออกจากเตาเผาแบบหมุนและเข้าสู่ถังสำหรับบรรจุชีวมวลทอรีไฟร์และปล่อยให้เย็นตัวลงที่บรรยากาศ ที่ระยะ 1 เมตร จะเป็นจุดที่ใช้อ้างอิงอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันเนื่องจากเป็นจุดที่ติดตั้งแหล่งความร้อนไว้ และที่ระยะ 6 เมตร จะเป็นส่วนที่ชีวมวลไหลเข้าสู่เตาเผาแบบหมุนจากฮอปเปอร์



รูปที่ 4.4 โปรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน
เชื้อเพลิงชีวมวล

4.4 residence time

ในการศึกษาการทดลองการทอรีแฟคชันในเตาเผาชีวมวลทอรีไฟร์แบบหมุนที่เงื่อนไขต่างๆ สามารถสรุปเป็นตาราง Residence time ได้ดังตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตารางที่ 4.2 แสดงค่า residence time ที่ 1 รอบต่อนาที

1 รอบต่อนาที	Residence time (นาที)	
	กลบ	ซังข้าวโพด
heating	50	37.5
torrefaction	54	40.5
cooling	16	12
เวลารวม	120	90

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า residence time ที่ 2 รอบต่อนาที

2 รอบต่อนาที	Residence time (นาที)	
	แกลบ	ซังข้าวโพด
heating	25	19
torrefaction	27	20
cooling	8	6
เวลารวม	60	45

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า residence time ที่ 3 รอบต่อนาที

3 รอบต่อนาที	Residence time (นาที)	
	แกลบ	ซังข้าวโพด
heating	19	12.5
torrefaction	20	13.5
cooling	6	4
เวลารวม	45	30

จากตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบในการหมุนเตาเผาเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ชีวมวลนั้นอยู่ภายในเตาเผาเป็นเวลาน้อยกว่าที่ความเร็วรอบที่ต่ำกว่า

4.5 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

ชีวมวลดิบหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันจะแสดงดังรูปที่ 4.5 โดยจากรูปจะแสดงถึงชีวมวลดิบแกลบและซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยจะสังเกตเห็นว่า ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นจะมีลักษณะสีดำคล้ำถ่านเนื่องจากกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นเป็นกระบวนการไพโรไลซิสอย่างอ่อนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จึงส่งผลให้ชีวมวลทอรีแฟคชันมีลักษณะคล้ายถ่าน และสามารถสังเกตเห็นว่าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าชีวมวลดิบเนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวของพันธะทางเคมีและความชื้นภายในชีวมวล จึงส่งผลให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นมีขนาดเล็กลง



(a) ชีวมวลแกลบก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน



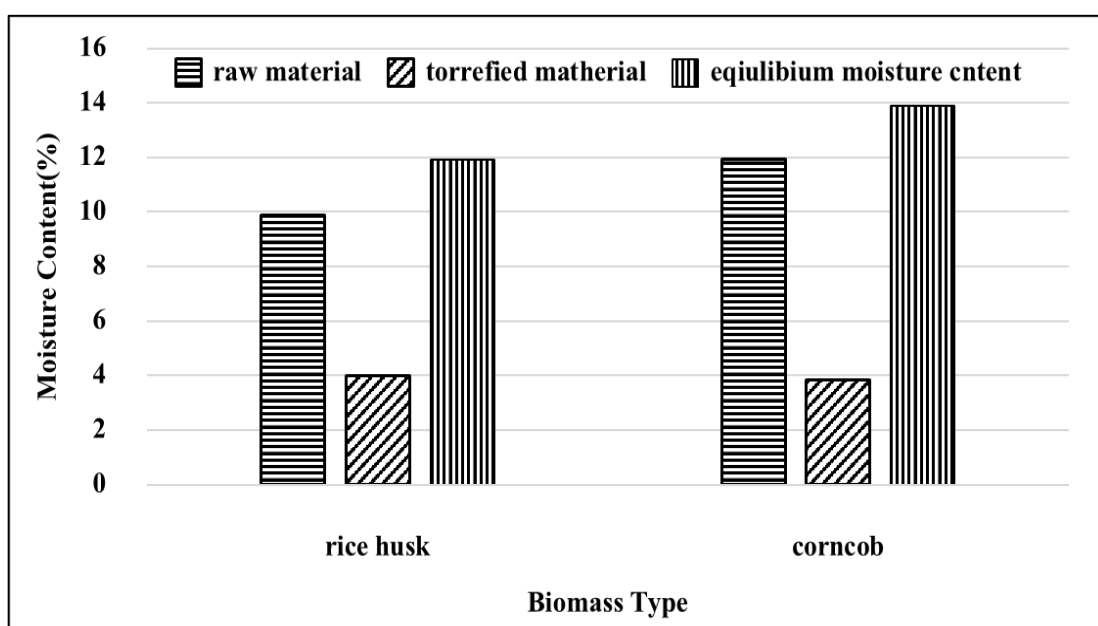
(b) ชีวมวลซังข้าวโพดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน

รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน

4.6 ความชื้น

รูปที่ 4.6 แสดงถึงค่าความชื้นของชีวมวลดิบแกลบและซังข้าวโพดก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน การทดลองพบว่าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันนั้นจะมีค่าความชื้นที่น้อยกว่าชีวมวลดิบ เนื่องจากความชื้นของชีวมวลบางส่วนนั้นได้ระเหยไปในระหว่างกระบวนการทอริแฟคชัน จากกราฟจะเห็นว่าค่าความชื้นของชีวมวลทอริไฟร์จะมีค่าน้อยกว่าของชีวมวลดิบ โดยค่าความชื้นของแกลบมีค่าเท่ากับ 9.87 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าเท่ากับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าชีวมวลดิบถึงถึง 61.20 เปอร์เซ็นต์ และค่าความชื้นของซังข้าวโพดก่อนทอริไฟร์มีค่าเท่ากับ 11.93 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นของซังข้าวโพดทอริไฟร์มีค่าเท่ากับ

3.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความชื้นของซังข้าวโพดทอริไฟร์มีค่าน้อยกว่าชีวมวลดิบถึง 67.89 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลเนื่องมาจากการที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในชีวมวลเมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟคชันจะเกิดการสลายตัว ส่งผลให้สูญเสียความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันนั้นมีความชื้นที่ลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบ และจากกราฟจะเห็นว่าค่าความชื้นสมดุลของชีวมวลทอริไฟร์ของแกลบและซังข้าวโพดจะมีค่าเท่ากับ 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความชื้นของชีวมวล

4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

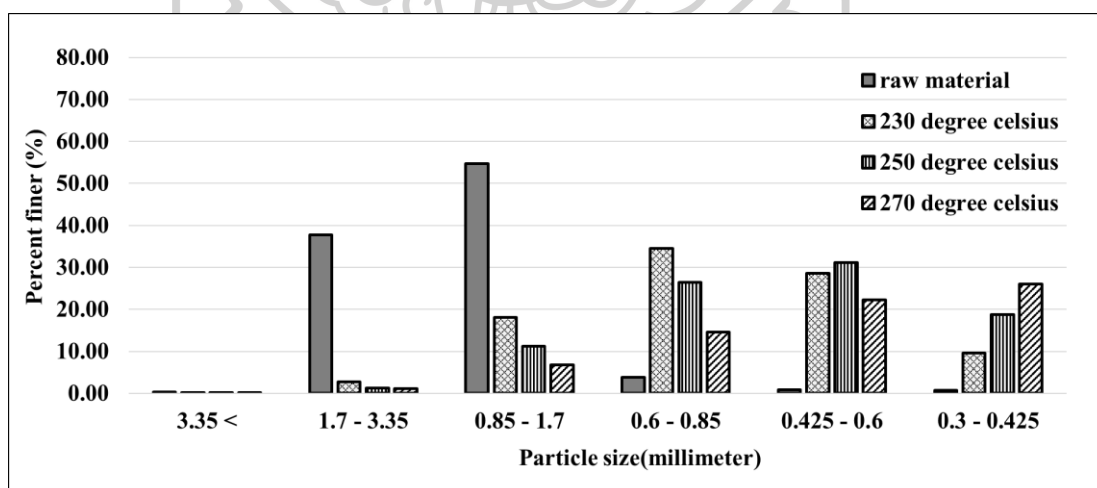
4.6.1 แกลบ

4.6.1.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที

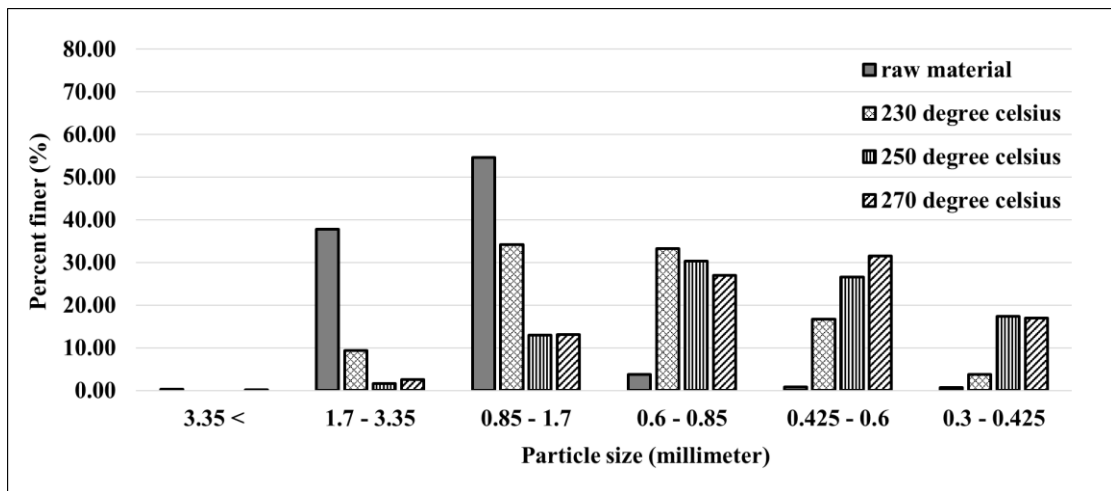
ในการศึกษาการทอริแฟคชันที่เงื่อนไขต่างๆในเตาเผาชีวมวลทอริไฟร์แบบหมุน และนำค่าชีวมวลก่อนและหลังการทอริไฟร์มาทำการทดลองหาค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวล ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D422 โดยเครื่องคัดแยกอนุภาค จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

รูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบ

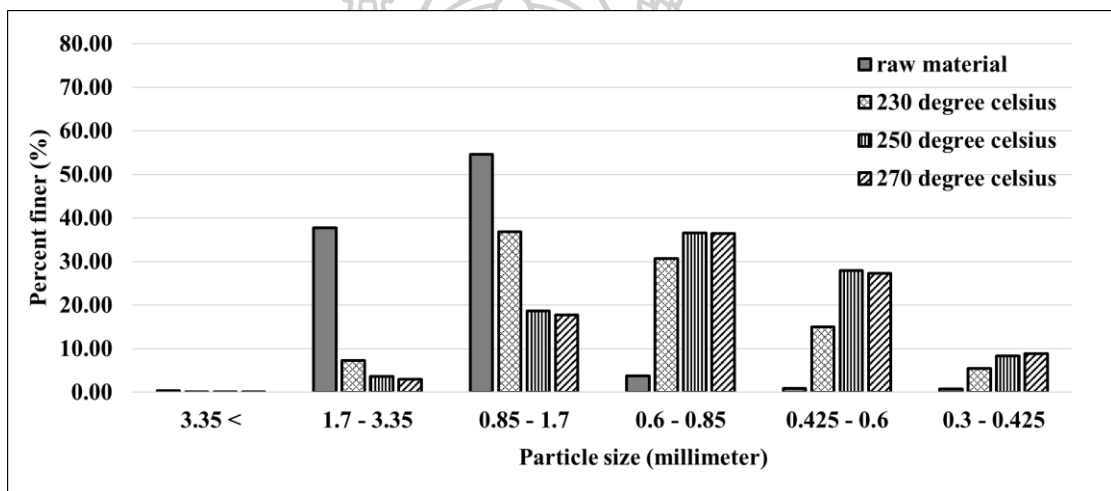
กับการกระจายตัวของชีวมวลดิบตามลำดับ โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดอนุภาคของชีวมวลทอร์ไฟร์ นั้นจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของชีวมวลดิบ โดยเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอร์ไฟชั่นมีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กที่มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น และจากกราฟจะพบว่าชีวมวลทอร์ไฟร์นั้นมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กที่มากกว่าของชีวมวลดิบอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอร์ไฟชั่น โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอร์ไฟชั่นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิทอร์ไฟร์ 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 จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิทอร์ไฟร์ 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 จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิทอร์ไฟร์ 250 และ 270 องศาเซลเซียสนั้นมีขนาดอนุภาคในช่วง 0.6 – 0.85 มิลลิเมตรที่ใกล้เคียงกันคือ 36.62 และ 36.50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 30.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามา [26, 27]



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอร์ไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

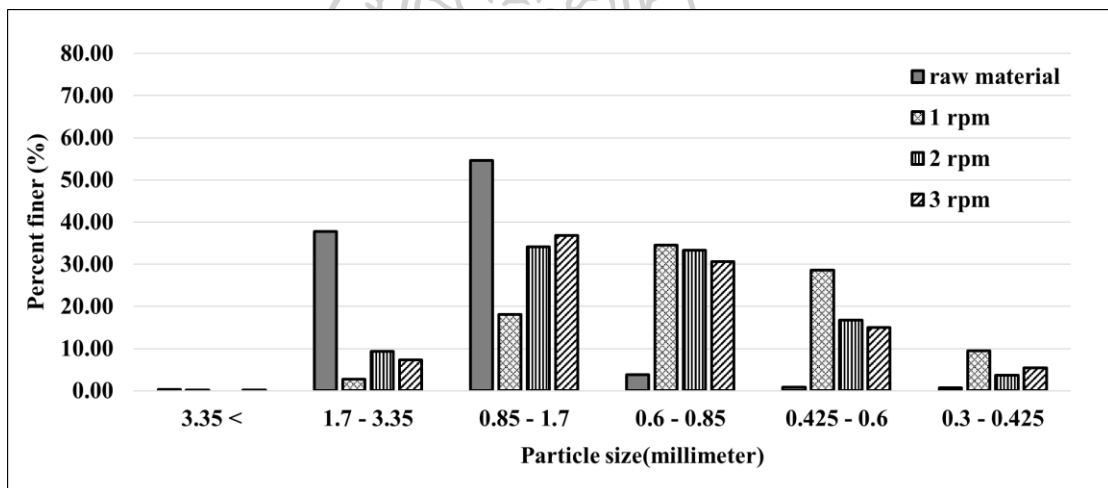


รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

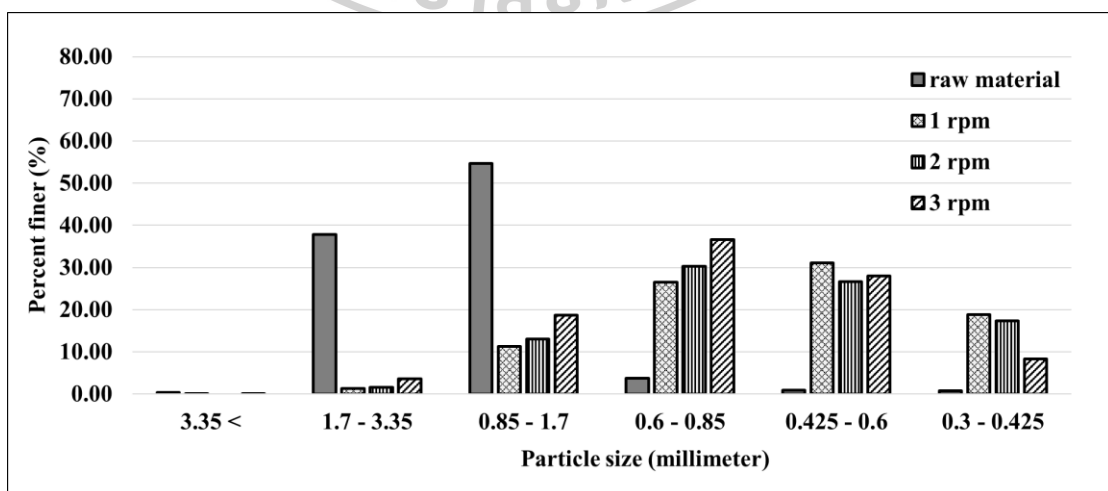
4.6.1.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของชีวมวลดิบนั้น จะถูกแสดงอยู่ดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่า การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชีวมวลดิบ โดยที่ความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง จะส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจาก เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง จะส่งผลให้ระยะเวลาที่ชีวมวลนั้นอยู่ภายในเตาเผาแบบหมุนนั้นนานมากขึ้น เป็นผลให้ชีวมวลนั้น

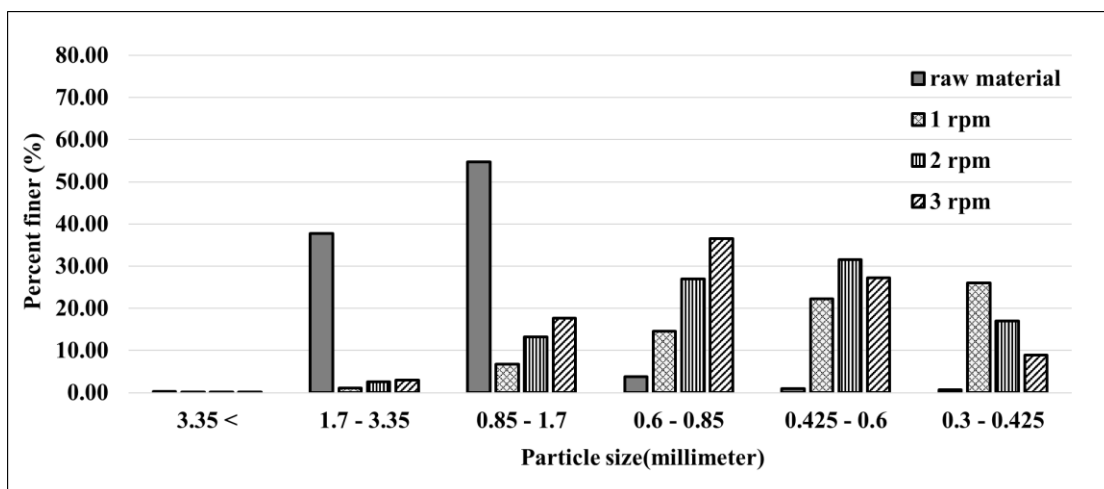
ได้รับความร้อนจากเตาเผาแบบหมุนเป็นเวลานานกว่าที่ความเร็วรอบการหมุนเตาเผาที่สูง โดยที่ความเร็วรอบการหมุนเตาเผาที่ต่ำนั้นชีวมวลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้นานกว่าที่ความเร็วรอบการหมุนเตาที่สูงทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวมากขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะสังเกตเห็นว่าขนาดอนุภาคในช่วง 0.425 – 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 4.10 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

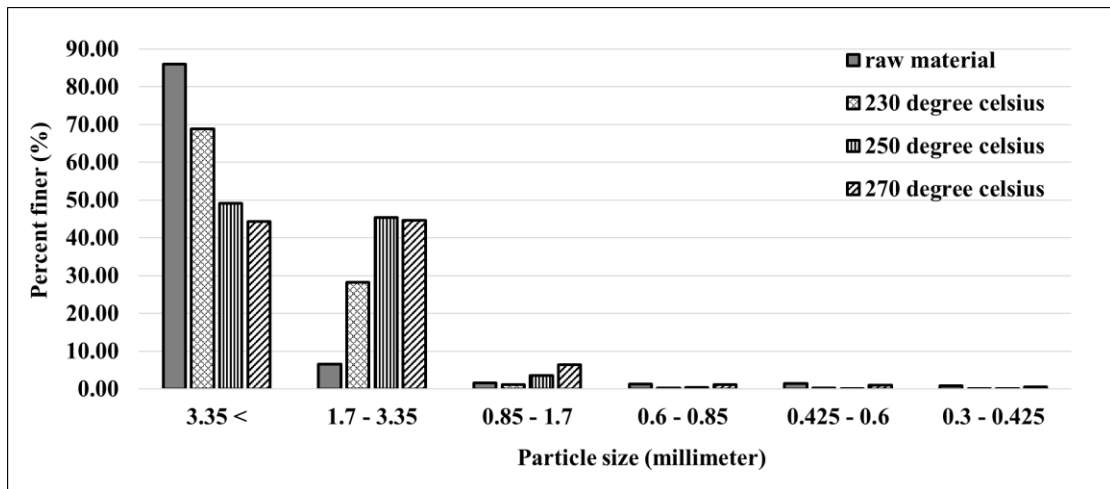


รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

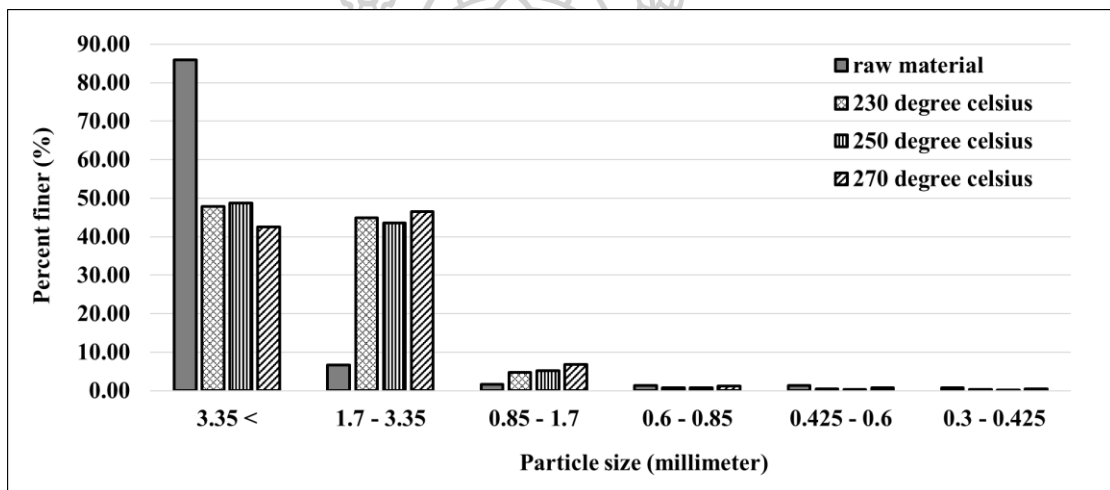
4.6.2 ชั่งข้าวโพด

4.6.2.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที

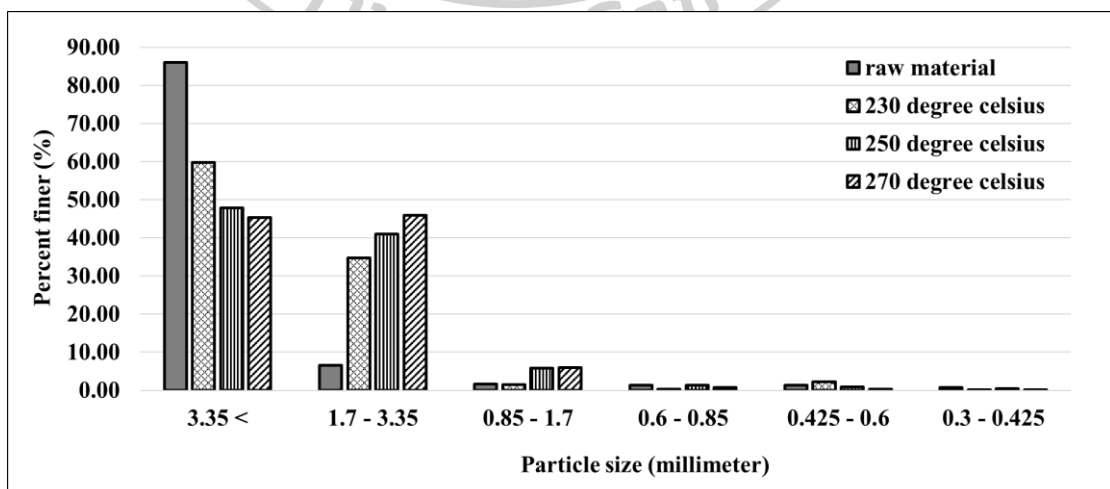
รูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของชีวมวลดิบชั่งข้าวโพด โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคชีวมวลทอริไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอริแฟชันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการสลายตัวของชีวมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 1.7 – 3.35 มิลลิเมตรจะพบว่า ชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



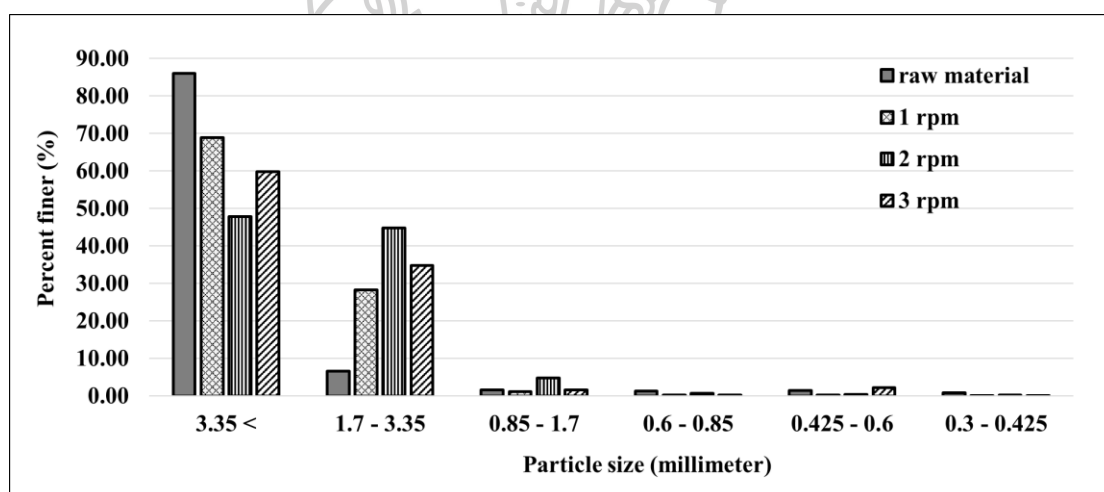
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที



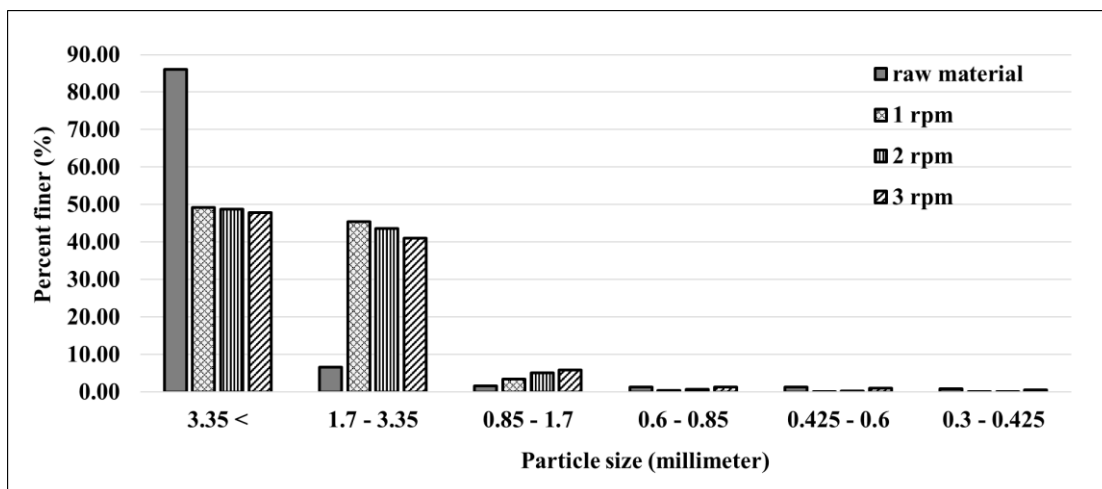
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.6.2.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส

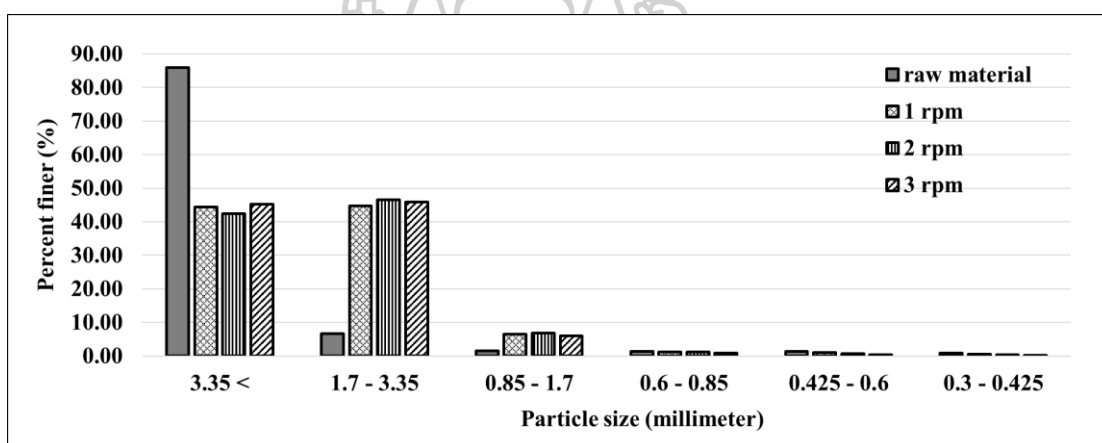
การกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของชีวมวลดิบ นั้นจะถูกแสดงอยู่ดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคซังข้าวโพดทอริไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง ส่งผลให้ชีวมวลได้รับความร้อนนานขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีออกซิเดชันได้นานขึ้นทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 1.7 - 3.35 มิลลิเมตรจะพบว่า ชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิและความเร็วรอบนั้นในการหมุนเตาเผาที่มีผลต่อค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น โดยในกระบวนการทอริแฟคชันนั้น เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์อนุภาคของชีวมวลขนาดใหญ่มีค่าลดลง และเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการสลายตัวของชีวมวลด้วยในระหว่างกระบวนการทอริแฟคชันทำให้ เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส เกิดการสลายตัว และทำให้ปริมาณความชื้นภายในชีวมวลลดลง ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของชีวมวลมีขนาดเล็กลง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการสูง การสลายตัวของอนุภาคจะยิ่งสูงตามไปด้วยทำให้อนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และที่ความเร็วรอบในการหมุนเตาที่ลดลงนั้นส่งผลให้ชีวมวลที่อยู่ในเตาเผาแบบหมุนนั้นได้รับความร้อนเป็นเวลานานมากยิ่งขึ้น ทำให้เวลาที่เกิดปฏิกิริยานั้นมากขึ้นตามไปด้วย

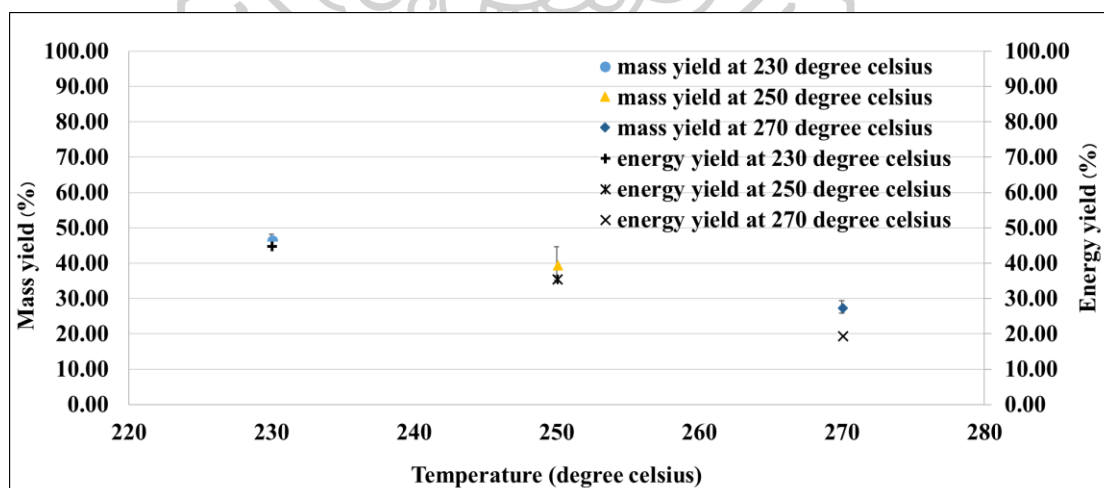
4.7 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

4.7.1 แกลบ

4.7.1.1 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็ว

รอบ 1 รอบต่อนาที

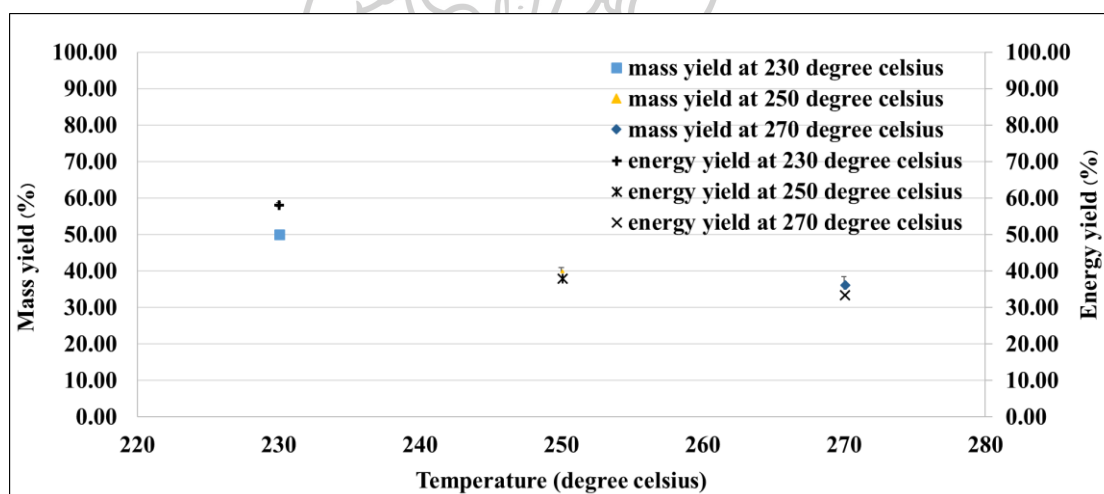
รูปที่ 4.19 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่แกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.78 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 39.63 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 27.58 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 44.96 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 35.78 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 19.66 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าผลได้เชิงพลังงานที่ลดลงนั้นเป็นผลเนื่องจากผลได้เชิงมวลที่ลดลง และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ลดลง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นทำให้อนุภาคของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันนั้นมีขนาดลดลงอย่างมากส่งผลให้ค่าความร้อนของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงและเนื่องด้วยแกลบนั้นมีปริมาณของซีเถ้าเป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ [31]



รูปที่ 4.19 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

4.7.1.2 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

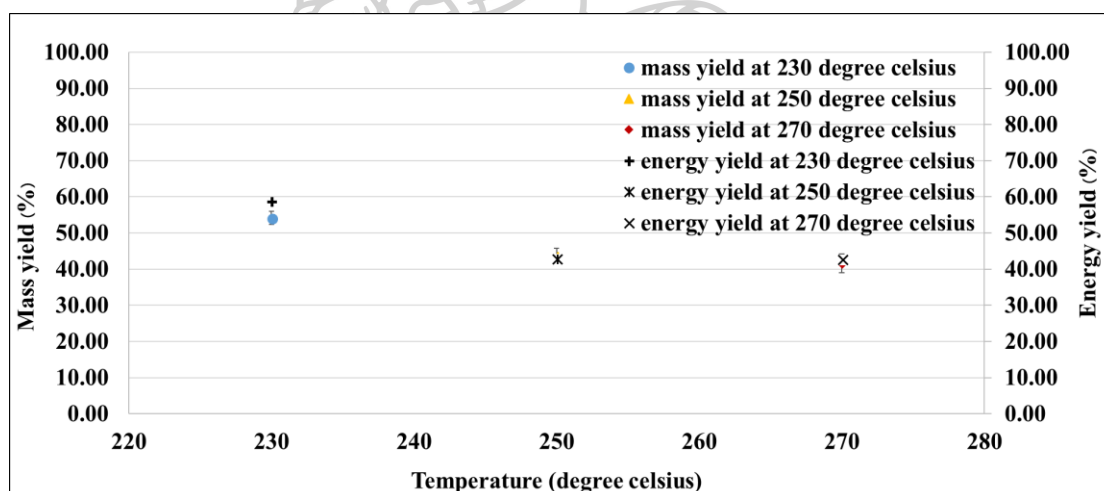
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.20 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่แกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 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 จีแนวนุ่มที่เหมือนกับแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.20 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

4.7.1.3 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

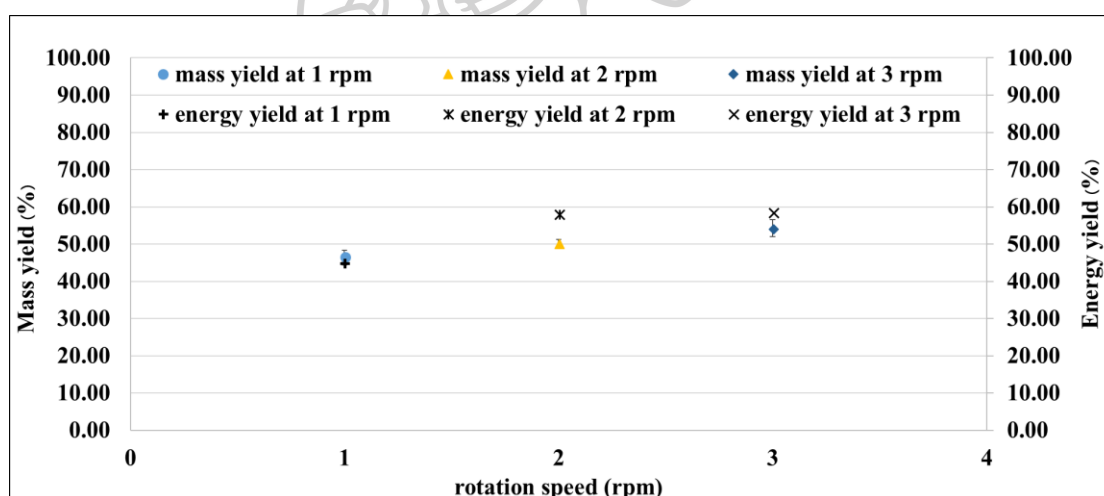
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่แกลบทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 54.22 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 43.78 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 41.55 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย 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 4.21 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.7.1.4 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

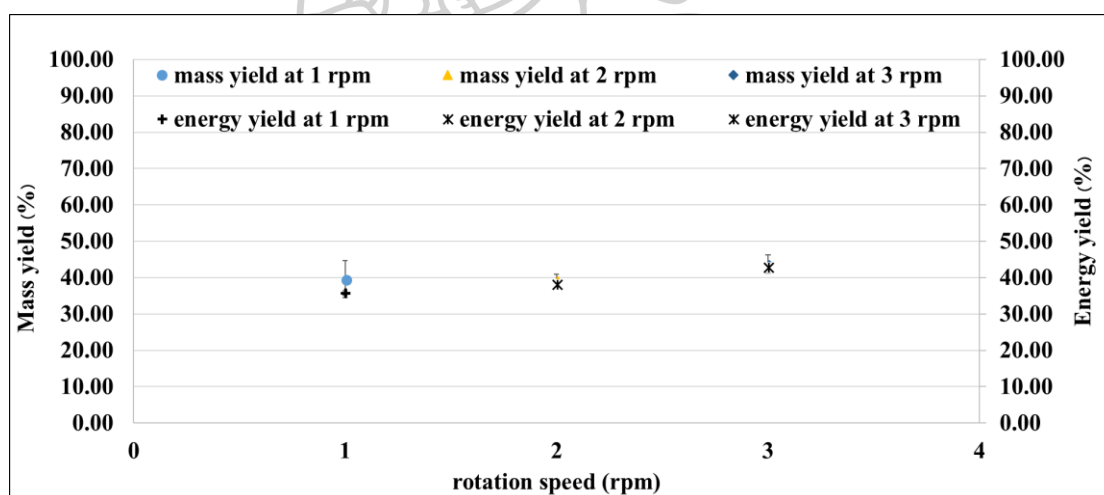
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.22 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วย เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้แกลบที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า จึงส่งผลเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการมากยิ่งขึ้นทำให้ผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.78 เปอร์เซ็นต์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 50.30 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 54.22 เปอร์เซ็นต์และผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 44.96 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.23 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.67 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.22 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

4.7.1.5 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

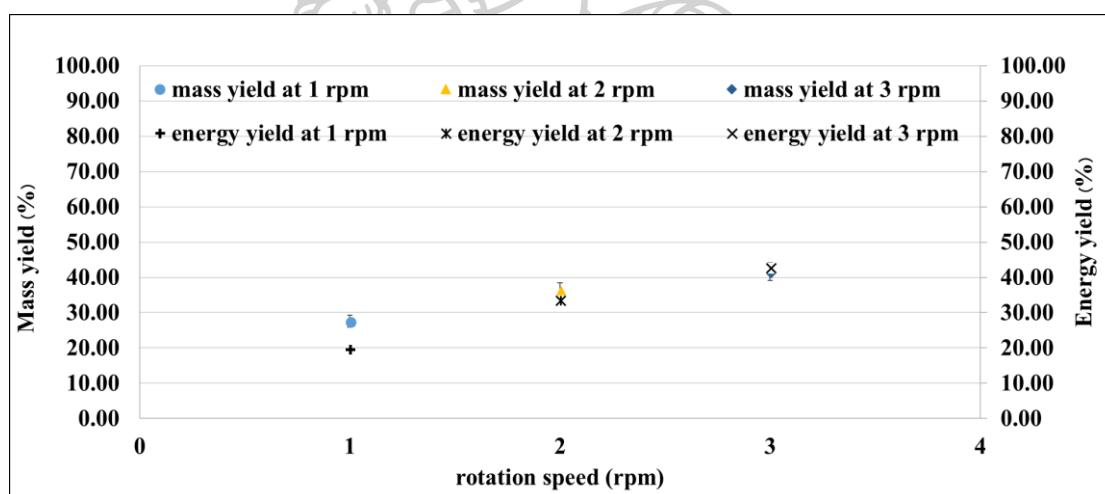
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.23 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงด้วย เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้แกลบที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า 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 4.23 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

4.7.1.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.24 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของแกลบทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้แกลบที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า 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



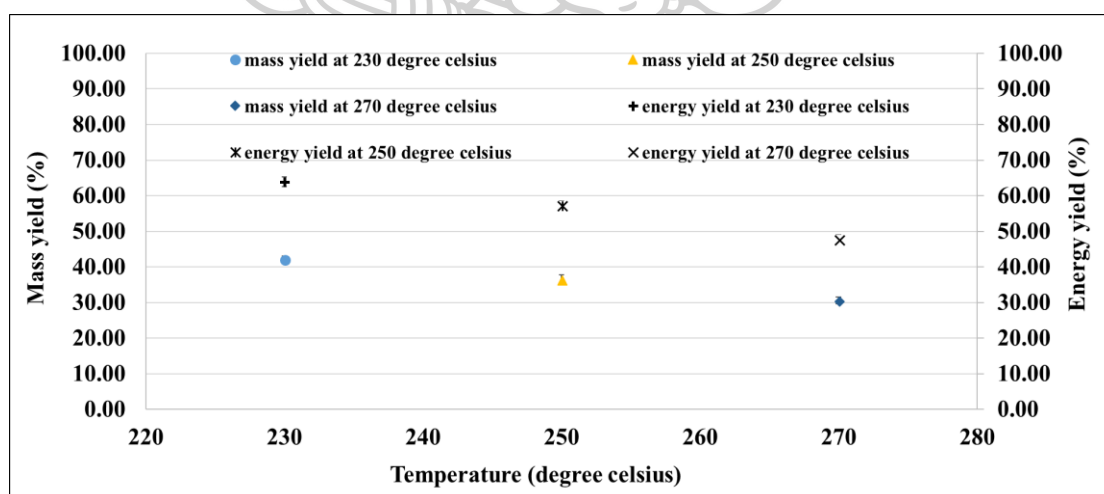
รูปที่ 4.24 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

4.7.2 ชั่งข้าวโพด

4.7.2.1 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่

ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

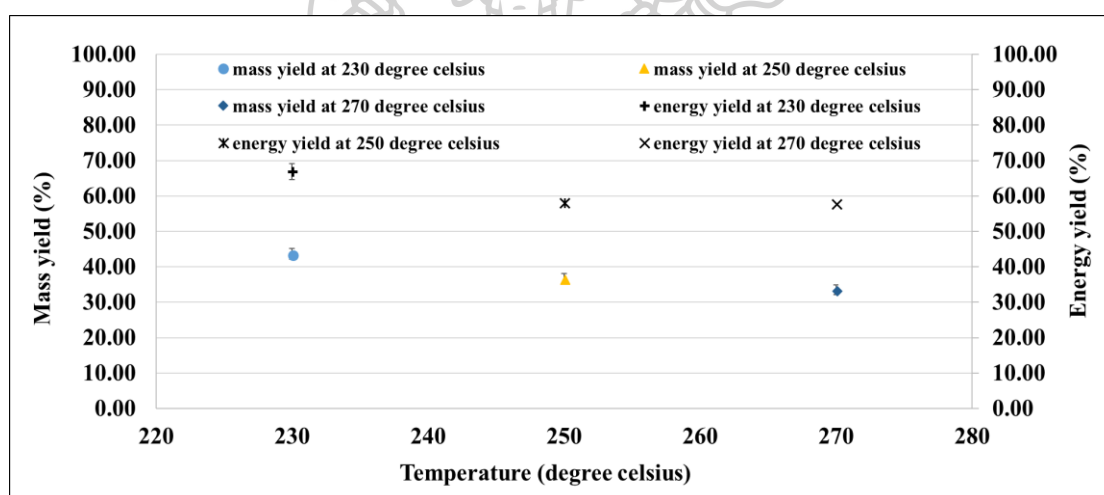
รูปที่ 4.25 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริไฟซ์ขั้นนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลงเนื่องมาจากการสลายตัวในระหว่างกระบวนการทอริไฟซ์ขั้น 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 ผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่ามากกว่าค่าผลได้เชิงมวลของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์เป็นผลเนื่องมาจากค่าความร้อนของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความร้อนของชั่งข้าวโพดก่อนทอริไฟร์



รูปที่ 4.25 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชั่งข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

4.7.2.2 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

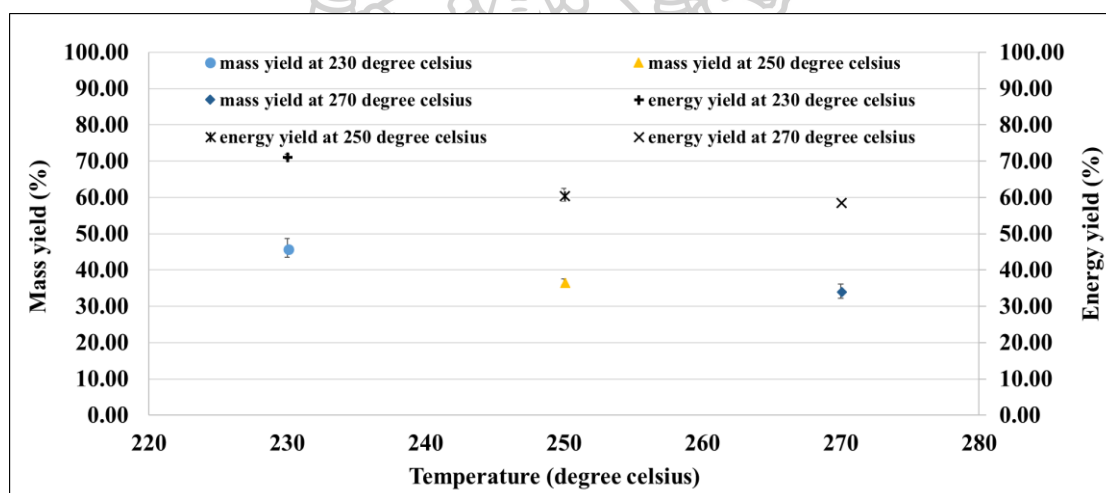
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงดังในรูปที่ 2.26 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่ซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 43.63 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.67 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 33.50 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 66.91 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.34 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 57.98 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.26 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

4.7.2.3 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

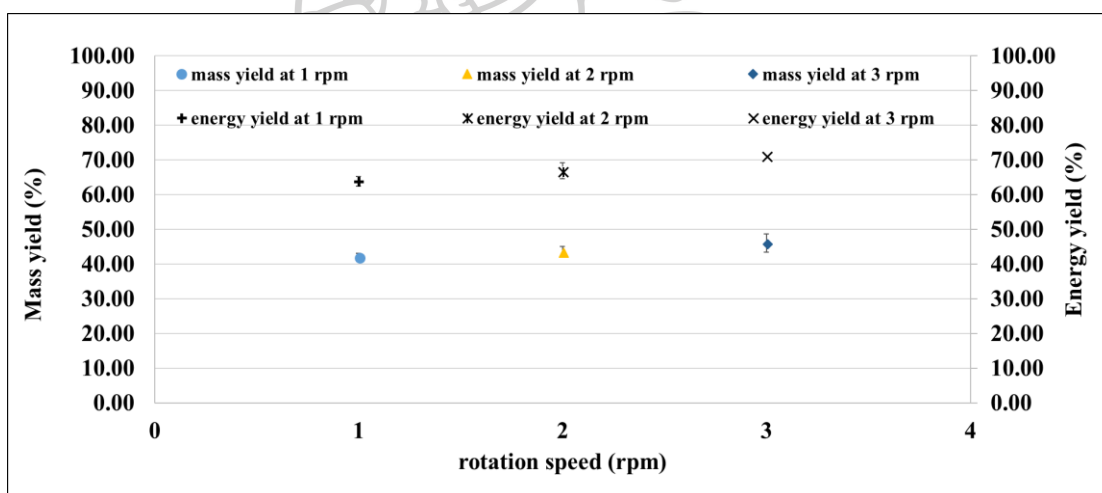
ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส จะแสดงดังในรูปที่ 2.27 โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง โดยที่ซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ 230 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 46.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ 250 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 36.69 เปอร์เซ็นต์ และที่ 270 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 34.18 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลที่มากขึ้นตามไปด้วย และผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 71.27 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสมีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 60.75 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้เชิงพลังงานเท่ากับ 58.75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.27 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

4.7.2.4 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

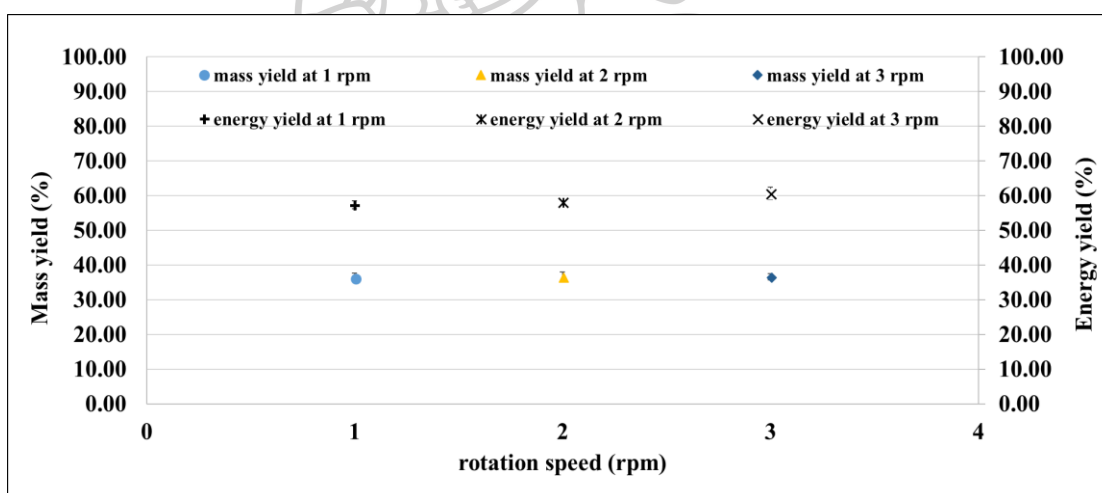
รูปที่ 4.28 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง ด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ซังข้าวโพดที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า 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 4.28 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

4.7.2.5 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

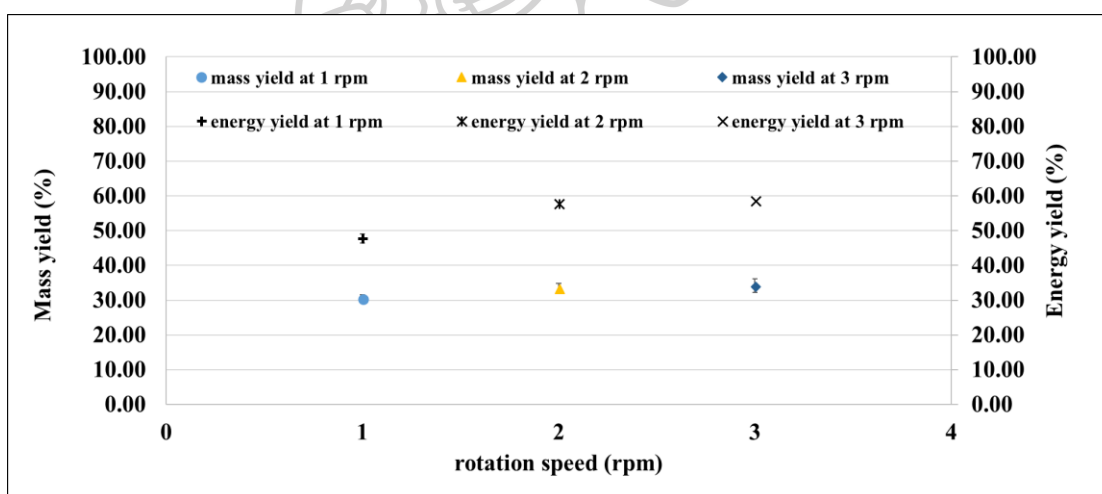
รูปที่ 4.29 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง ด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ซังข้าวโพดที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า 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 4.29 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

4.7.2.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.30 แสดงถึงผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยจากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ค่าผลได้เชิงมวลของซังข้าวโพดทอริไฟร์นั้นมีค่าลดลง ด้วยเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาขึ้นลงจะส่งผลให้ซังข้าวโพดที่ถูกนำมาใช้ในการทอริไฟร์นั้นมีระยะเวลาที่ถูกทอริไฟร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วรอบที่มากกว่า 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 4.30 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของซังข้าวโพดทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

บทที่ 5 สรุปผลวิจัย

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเตาเผาแบบหมุน การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุน โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุน ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ค่าความชื้นของชีวมวล ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ค่าผลได้เชิงมวล และผลได้เชิงพลังงาน ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบ ต่อนาที และอุณหภูมิ 230, 250 และ 290 องศาเซลเซียสนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุน

จากการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนสามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นสามารถแบ่งช่วงของเตาเผาออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงไล่ความชื้น คือในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส ช่วงทอรีแฟคชัน คือในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส และช่วงทำให้เย็น คือช่วงที่ปล่อยให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันเย็นตัวลงที่อุณหภูมิบรรยากาศ

5.2 โพรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาเผาแบบหมุน

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ในกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นมีการให้ความร้อนกับเตาเผาอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนกระทั่งถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชัน โดยเมื่อให้อุณหภูมิแก่เตาเผาจนถึงอุณหภูมิสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันแล้ว จะทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะคงตัวที่ ± 5 องศาเซลเซียสจนเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชัน

5.3 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าลักษณะทางกายภาพของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นจะมีลักษณะที่มีสีดำคล้ำถ่าน มีความเปราะ และมีขนาดที่เล็กลง

5.4 ความชื้น

จากการศึกษาพบว่าค่าความชื้นของชีวมวลหลังจากที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นมีค่าน้อยลง เนื่องมาจากการที่น้ำบางส่วนภายในชีวมวลสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชัน ส่งผลให้ค่าความชื้นของชีวมวลนั้นมีค่าลดลง

5.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

จากการศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชัน และ ความเร็วรอบในการหมุนเตาเผา นั้นมีผลต่อค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค โดยเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชีวมวลนั้นเกิดการสลายตัวมากยิ่งขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคนั้นมีขนาดที่เล็กลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และที่ความเร็วรอบที่ลดลงนั้น ส่งผลให้เวลาที่ชีวมวลได้รับความร้อนจากเตาเผาแบบหมุนนานมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการสลายตัวมากยิ่งขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคของชีวมวลมีขนาดที่เล็กลง

5.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

5.6.1 แกลบ

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิและความเร็วรอบมีผลต่อค่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบ โดยเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลได้ผลได้เชิงมวลของแกลบลดลงเนื่องจากการสลายตัวที่มากขึ้นในระหว่างกระบวนการและจากการที่เกิดการสลายตัวมากขึ้นนั้นทำให้ปริมาณขี้เถ้าของแกลบมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนของแกลบนั้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ จึงเป็นผลให้ค่าผลได้เชิงพลังงานของแกลบนั้นมีค่าที่ลดลงตามไปด้วย และจากความเร็วรอบของเตาจะเห็นว่าที่ความเร็วรอบต่ำนั้นชีวมวลจะเกิดการสลายตัวที่มากกว่าที่ความเร็วรอบสูง เป็นผลให้ค่าผลได้เชิงมวลมีค่าน้อยลงที่ความเร็วรอบต่ำและมีค่าผลได้เชิงพลังงานน้อยลงตามไปด้วย

5.6.2 ชังข้าวโพด

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิและความเร็วรอบมีผลต่อค่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชังข้าวโพด โดยเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลได้ผลได้เชิงมวลของชังข้าวโพดลดลงเนื่องจากการสลายตัวที่มากขึ้นในระหว่างกระบวนการ และจากกระบวนการทอรีแฟคชันชังข้าวโพดนั้น ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้นั้นสูงขึ้น จึงเป็นผลให้ค่าผลได้เชิงพลังงานของชังข้าวโพดนั้นมีค่าที่มากขึ้นตามไปด้วย และจากความเร็วรอบของเตาจะเห็นว่าที่ความเร็วรอบต่ำนั้นชีวมวลจะเกิดการสลายตัวที่มากกว่าที่ความเร็วรอบสูง เป็นผลให้ค่าผลได้เชิงมวลมีค่าน้อยลงที่ความเร็วรอบต่ำและมีค่าผลได้เชิงพลังงานน้อยลงตามไปด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] C. Sheng, J.L.T. Azevedo, Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass and Bioenergy*, 28 (2005) 499-507.
- [2] T. Kerdchuen, Renewable Energy in Thailand: Opportunity and Technology Allocation, *Energy Procedia*, 34 (2013) 13-16.
- [3] W.-H. Chen, P.-C. Kuo, Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass, *Energy*, 36 (2011) 803-811.
- [4] S.-W. Park, C.-H. Jang, K.-R. Baek, J.-K. Yang, Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: Evaluation of fuel characteristics of the products, *Energy*, 45 (2012) 676-685.
- [5] B. Acharya, I. Sule, A.J.B.C. Dutta, Biorefinery, A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing, 2 (2012) 349-369.
- [6] N.S. W. Junsatien, S. Phetsong, Torrefaction Reactors, *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 32 (2013) 84-91.
- [7] V.V. Kosov, V.A. Sinelshchikov, G.A. Sytchev, V.M.J.H.T. Zaichenko, Effect of torrefaction on properties of solid granulated fuel of different biomass types, 52 (2014) 907-912.
- [8] J. Kihedu, Torrefaction and Combustion of Ligno-Cellulosic Biomass, *Energy Procedia*, 75 (2015) 162-167.
- [9] N.T. N. Tharawadee, Effects of Torrefaction Process on Physical Properties and Operating Cost of Biomass Powder, *Transactions of the TSME (2015) Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, (2015).
- [10] P. McKendry, Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Bioresource Technology*, 83 (2002) 37-46.
- [11] R.D.B. J.S. Wright, R.J. Hess, S. Sokhansanj,, Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development.
- [12] W.-H. Chen, H.-C. Hsu, K.-M. Lu, W.-J. Lee, T.-C. Lin, Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass, *Energy*, 36 (2011) 3012-3021.
- [13] M. Phanphanich, S. Mani, Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of

forest biomass, *Bioresource Technology*, 102 (2011) 1246-1253.

[14] T.G. Bridgeman, J.M. Jones, I. Shield, P.T. Williams, Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties, *Fuel*, 87 (2008) 844-856.

[15] M. Erol, H. Haykiri-Acma, S. Küçükbayrak, Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data, 2010.

[16] P. Rousset, C. Aguiar, N. Labbé, J.-M. Commandré, Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction, *Bioresource Technology*, 102 (2011) 8225-8231.

[17] D. Tito Ferro, V. Vigouroux, A. Grimm, R. Vigouroux, Torrefaction of agricultural and forest residues, 2004.

[18] J.H. Peng, H.T. Bi, S. Sokhansanj, J.C. Lim, A Study of Particle Size Effect on Biomass Torrefaction and Densification, *Energy & Fuels*, 26 (2012) 3826-3839.

[19] A.A. Boateng, Rotary kiln transport phenomena and transport processes.

[20] A.S. Bongo Njeng, S. Vitu, M. Clausse, J.L. Dirion, M. Debaq, Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln: Part I. Experimental RTD and axial dispersion study, *Powder Technology*, 269 (2015) 554-565.

[21] A.S. Bongo Njeng, S. Vitu, M. Clausse, J.L. Dirion, M. Debaq, Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln: Part II. Experimental hold-up and mean residence time modeling, *Powder Technology*, 269 (2015) 566-576.

[22] H. Lee, S.J.J.o.M.S. Choi, Technology, Lifter design for enhanced heat transfer in a rotary kiln reactor, 27 (2013) 3191-3197.

[23] P.d.F.A.v. Vught, MODELLING OF ROTARY KILNS.

[24] Y. Mei, R. Liu, Q. Yang, H. Yang, J. Shao, C. Draper, S. Zhang, H. Chen, Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas, *Bioresource Technology*, 177 (2015) 355-360.

[25] B. Colin, J.-L. Dirion, P. Arlabosse, S. Salvador, Experimental Study of Wood Chips Torrefaction in a Pilot-Scale Rotary Kiln, in: *ICONBM: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMASS, PTS 1 AND 2*, Vol. 37, Florence, Italy, 2014, pp. p. 505-510.

[26] S. Zhang, T. Chen, Y. Xiong, Q. Dong, Effects of wet torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis product properties of rice husk, *Energy Conversion and Management*, 141

(2017) 403-409.

[27] M. Ahiduzzaman, A.K.M.S. Islam, Energy Yield of Torrefied Rice Husk at Atmospheric Condition, *Procedia Engineering*, 105 (2015) 719-724.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ตารางค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา

การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาที่ความเร็ว 1 รอบต่อนาที

ระยะ (เมตร)	ขาออก ชีวมวล	จุดอ้างอิง อุณหภูมิทอร์ไพร์	2	3	4	5	ขาเข้า ชีวมวล
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	123.79	231.12	215.95	200.78	183.97	173.61	155.26
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	132.76	250.54	235.28	219.81	199.76	187.60	167.68
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	137.53	270.21	252.53	235.37	212.62	198.07	176.98

การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาที่ความเร็ว 2 รอบต่อนาที

ระยะ (เมตร)	ขาออก ชีวมวล	จุดอ้างอิง อุณหภูมิทอร์ไพร์	2	3	4	5	ขาเข้า ชีวมวล
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	125.23	231.06	222.63	207.61	190.17	176.19	160.67
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	131.69	250.93	243.87	229.88	207.80	190.00	173.19
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	129.82	270.00	239.16	241.87	213.39	194.19	157.99

การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาที่ความเร็ว 3 รอบต่อนาที

ระยะ (เมตร)	ขาออก ชีวมวล	จุดอ้างอิง อุณหภูมิทอร์ไพร์	2	3	4	5	ขาเข้า ชีวมวล
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	100.13	229.51	175.18	177.54	160.79	137.20	121.48
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	109.54	249.65	210.21	208.29	185.15	145.52	133.75
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	114.04	270.29	206.22	199.11	176.91	162.22	134.05



ภาคผนวก ข

ตารางค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา



ภาคผนวก ข
ค่าความชื้น

บทที่ 6 ตารางแสดงค่าความชื้นของแกลบก่อนและหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ลำดับ	ตัวอย่าง	ความชื้น	ความชื้นเฉลี่ย			
1	ซีวมวลดิบ	10	9.86			
2		9.2				
3		10.4				
4	n = 1rpm	230	1	3.4	3.98	
5			2	3.4		
6			3	3.4		
7		250	1	3.4		
8			2	3.6		
9			3	4		
10		270	1	4.6		
11			2	6		
12			3	5.8		
13		n = 2rpm	230	1		3
14				2		3
15				3		2
16	250		1	3.8		
17			2	3.4		
18			3	4.4		
19	270		1	3.4		
20			2	5		
21			3	8		
22	n = 3rpm	230	1	3		
23			2	2.4		
24			3	2.6		
25		250	1	4.2		
26			2	4.8		
27			3	4.4		
28		270	1	4.2		
29			2	4.4		
30			3	4		

บทที่ 7 ตารางแสดงค่าความชื้นของซังข้าวโพดก่อนและหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ตัวอย่าง			ความชื้น	ความชื้นเฉลี่ย
ซีวมวลดิบ			11.6	11.93
			11.8	
			12.4	
n = 1rpm	230	1	2.8	3.83
	230	2	3.2	
	230	3	3	
	250	1	3.4	
	250	2	3.4	
	250	3	3	
	270	1	3.8	
	270	2	3.8	
	270	3	3.4	
n = 2rpm	230	1	4.4	3.83
	230	2	4.4	
	230	3	3.2	
	250	1	3	
	250	2	3.4	
	250	3	3.8	
	270	1	4.2	
	270	2	3.6	
	270	3	4	
n = 3rpm	230	1	4.2	3.83
	230	2	3.2	
	230	3	4.6	
	250	1	5	
	250	2	4.2	
	250	3	4.8	
	270	1	4.8	
	270	2	4.8	
	270	3	4	



การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกสที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

size	230	250	270	raw matherial
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	0.07	0.03	0.10	0.30
1.7 - 3.35	2.71	1.28	1.06	37.80
0.85 - 1.7	18.03	11.21	6.77	54.66
0.6 - 0.85	34.51	26.49	14.62	3.77
0.425 - 0.6	28.54	31.12	22.23	0.89
0.3 - 0.425	9.53	18.78	26.07	0.69
0.212 - 0.3	3.03	6.45	15.81	0.50
0.15 - 0.212	1.25	2.35	7.96	0.30
0.106 - 0.15	0.46	0.53	1.93	0.20
0.075 - 0.106	0.33	0.30	0.76	0.30
0.053 - 0.075	0.46	0.36	0.73	0.20
<0.053	1.08	1.09	1.96	0.40

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแก๊สที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

size	230	250	270	raw mat
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	0.00	0.00	0.20	0.30
1.7 - 3.35	9.38	1.61	2.58	37.80
0.85 - 1.7	34.15	13.02	13.17	54.66
0.6 - 0.85	33.26	30.32	26.94	3.77
0.425 - 0.6	16.77	26.63	31.55	0.89
0.3 - 0.425	3.71	17.34	16.97	0.69
0.212 - 0.3	1.09	6.64	4.74	0.50
0.15 - 0.212	0.50	2.60	1.57	0.30
0.106 - 0.15	0.05	0.50	0.39	0.20
0.075 - 0.106	0.05	0.20	0.33	0.30
0.053 - 0.075	0.70	0.30	0.49	0.20
<0.053	0.35	0.85	1.08	0.40

ารกระจายตัวของขนาดอนุภาคแกลบที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

size	230.00	250.00	270.00	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	0.07	0.10	0.13	0.30
1.7 - 3.35	7.34	3.57	2.96	37.80
0.85 - 1.7	36.80	18.72	17.69	54.66
0.6 - 0.85	30.67	36.63	36.50	3.77
0.425 - 0.6	15.01	27.93	27.25	0.89
0.3 - 0.425	5.46	8.28	8.92	0.69
0.212 - 0.3	2.23	2.42	3.03	0.50
0.15 - 0.212	0.98	0.89	1.37	0.30
0.106 - 0.15	0.33	0.26	0.49	0.20
0.075 - 0.106	0.23	0.20	0.36	0.30
0.053 - 0.075	0.30	0.30	0.42	0.20
<0.053	0.59	0.69	0.88	0.40

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแก๊สที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

size	1	2	3	raw matherial
	(%)	(%)	(%)	(%)
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
0.212 - 0.3	3.03	1.09	2.23	0.50
0.15 - 0.212	1.25	0.50	0.98	0.30
0.106 - 0.15	0.46	0.05	0.33	0.20
0.075 - 0.106	0.33	0.05	0.23	0.30
0.053 - 0.075	0.46	0.70	0.30	0.20
<0.053	1.08	0.35	0.59	0.40

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแก๊สที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

temperature	1	2	3	raw matherial
size	(%)	(%)	(%)	(%)
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
0.212 - 0.3	6.45	6.64	2.42	0.50
0.15 - 0.212	2.35	2.60	0.89	0.30
0.106 - 0.15	0.53	0.50	0.26	0.20
0.075 - 0.106	0.30	0.20	0.20	0.30
0.053 - 0.075	0.36	0.30	0.30	0.20
<0.053	1.09	0.85	0.69	0.40

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแก๊สที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

size	1	2	3	raw matherial
	(%)	(%)	(%)	(%)
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
0.212 - 0.3	15.81	4.74	3.03	0.50
0.15 - 0.212	7.96	1.57	1.37	0.30
0.106 - 0.15	1.93	0.39	0.49	0.20
0.075 - 0.106	0.76	0.33	0.36	0.30
0.053 - 0.075	0.73	0.49	0.42	0.20
<0.053	1.96	1.08	0.88	0.40

การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

size	230	250	270	Raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	68.86	49.16	44.36	86.00
1.7 - 3.35	28.27	45.42	44.70	6.61
0.85 - 1.7	1.21	3.49	6.48	1.58
0.6 - 0.85	0.30	0.46	1.16	1.28
0.425 - 0.6	0.25	0.05	0.96	1.38
0.3 - 0.425	0.15	0.10	0.51	0.79
0.212 - 0.3	0.15	0.15	0.30	0.49
0.15 - 0.212	0.10	0.10	0.25	0.39
0.106 - 0.15	0.10	0.20	0.10	0.30
0.075 - 0.106	0.10	0.10	0.15	0.30
0.053 - 0.075	0.20	0.20	0.30	0.49
<0.053	0.30	0.56	0.71	0.39

การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

size	230	250	270	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	47.90	48.69	42.49	86.00
1.7 - 3.35	44.86	43.62	46.53	6.61
0.85 - 1.7	4.71	5.16	6.86	1.58
0.6 - 0.85	0.71	0.76	1.27	1.28
0.425 - 0.6	0.46	0.30	0.74	1.38
0.3 - 0.425	0.25	0.10	0.44	0.79
0.212 - 0.3	0.25	0.10	0.34	0.49
0.15 - 0.212	0.15	0.15	0.23	0.39
0.106 - 0.15	0.10	0.10	0.13	0.30
0.075 - 0.106	0.10	0.10	0.13	0.30
0.053 - 0.075	0.20	0.30	0.23	0.49
<0.053	0.30	0.61	0.60	0.39

การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

size	230	250	270	raw material
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	59.78	47.83	45.30	86.00
1.7 - 3.35	34.74	41.06	45.90	6.61
0.85 - 1.7	1.57	5.79	5.97	1.58
0.6 - 0.85	0.29	1.31	0.81	1.28
0.425 - 0.6	2.25	0.94	0.30	1.38
0.3 - 0.425	0.10	0.50	0.10	0.79
0.212 - 0.3	0.20	0.40	0.20	0.49
0.15 - 0.212	0.20	0.37	0.10	0.39
0.106 - 0.15	0.10	0.30	0.10	0.30
0.075 - 0.106	0.20	0.30	0.10	0.30
0.053 - 0.075	0.29	0.44	0.40	0.49
<0.053	0.29	0.74	0.71	0.39

การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

size	1	2	3	raw matherial
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	68.86	47.90	59.78	86.00
1.7 - 3.35	28.27	44.86	34.74	6.61
0.85 - 1.7	1.21	4.71	1.57	1.58
0.6 - 0.85	0.30	0.71	0.29	1.28
0.425 - 0.6	0.25	0.46	2.25	1.38
0.3 - 0.425	0.15	0.25	0.10	0.79
0.212 - 0.3	0.15	0.25	0.20	0.49
0.15 - 0.212	0.10	0.15	0.20	0.39
0.106 - 0.15	0.10	0.10	0.10	0.30
0.075 - 0.106	0.10	0.10	0.20	0.30
0.053 - 0.075	0.20	0.20	0.29	0.49
<0.053	0.30	0.30	0.29	0.39

การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

size	1	2	3	raw matherial
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	49.16	48.69	47.83	86.00
1.7 - 3.35	45.42	43.62	41.06	6.61
0.85 - 1.7	3.49	5.16	5.79	1.58
0.6 - 0.85	0.46	0.76	1.31	1.28
0.425 - 0.6	0.05	0.30	0.94	1.38
0.3 - 0.425	0.10	0.10	0.50	0.79
0.212 - 0.3	0.15	0.10	0.40	0.49
0.15 - 0.212	0.10	0.15	0.37	0.39
0.106 - 0.15	0.20	0.10	0.30	0.30
0.075 - 0.106	0.10	0.10	0.30	0.30
0.053 - 0.075	0.20	0.30	0.44	0.49
<0.053	0.56	0.61	0.74	0.39

การกระจายตัวของซังข้าวโพดขนาดอนุภาคที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

size	1	2	3	raw matherial
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	44.36	42.49	45.30	86.00
1.7 - 3.35	44.70	46.53	45.90	6.61
0.85 - 1.7	6.48	6.86	5.97	1.58
0.6 - 0.85	1.16	1.27	0.81	1.28
0.425 - 0.6	0.96	0.74	0.30	1.38
0.3 - 0.425	0.51	0.44	0.10	0.79
0.212 - 0.3	0.30	0.34	0.20	0.49
0.15 - 0.212	0.25	0.23	0.10	0.39
0.106 - 0.15	0.10	0.13	0.10	0.30
0.075 - 0.106	0.15	0.13	0.10	0.30
0.053 - 0.075	0.30	0.23	0.40	0.49
<0.053	0.71	0.60	0.71	0.39



ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของแกลบทอริไฟร์

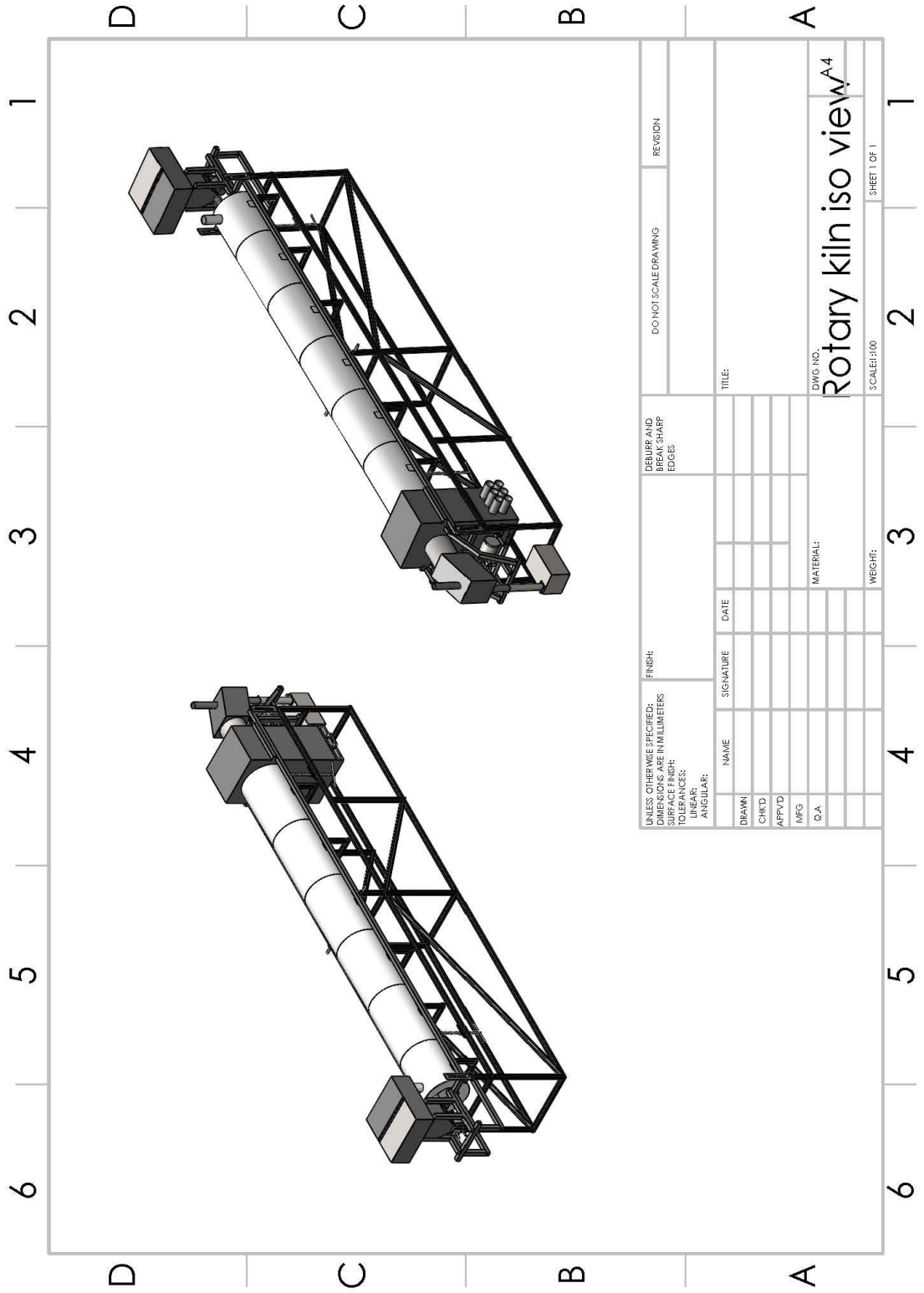
rpm	อุณหภูมิ	mass yield	energy yield	energy yield average	sd	error
1	230	46.40	44.56	44.96	0.46	0.68
	230		45.47			
	230		44.86			
	250	35.10	36.21	35.78	0.39	0.63
	250		35.44			
	250		35.70			
	270	27.58	19.66	19.66	0.00	0.00
	270		19.66			
	270		19.66			
2	230	50.30	58.01	58.23	0.38	0.61
	230		58.67			
	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

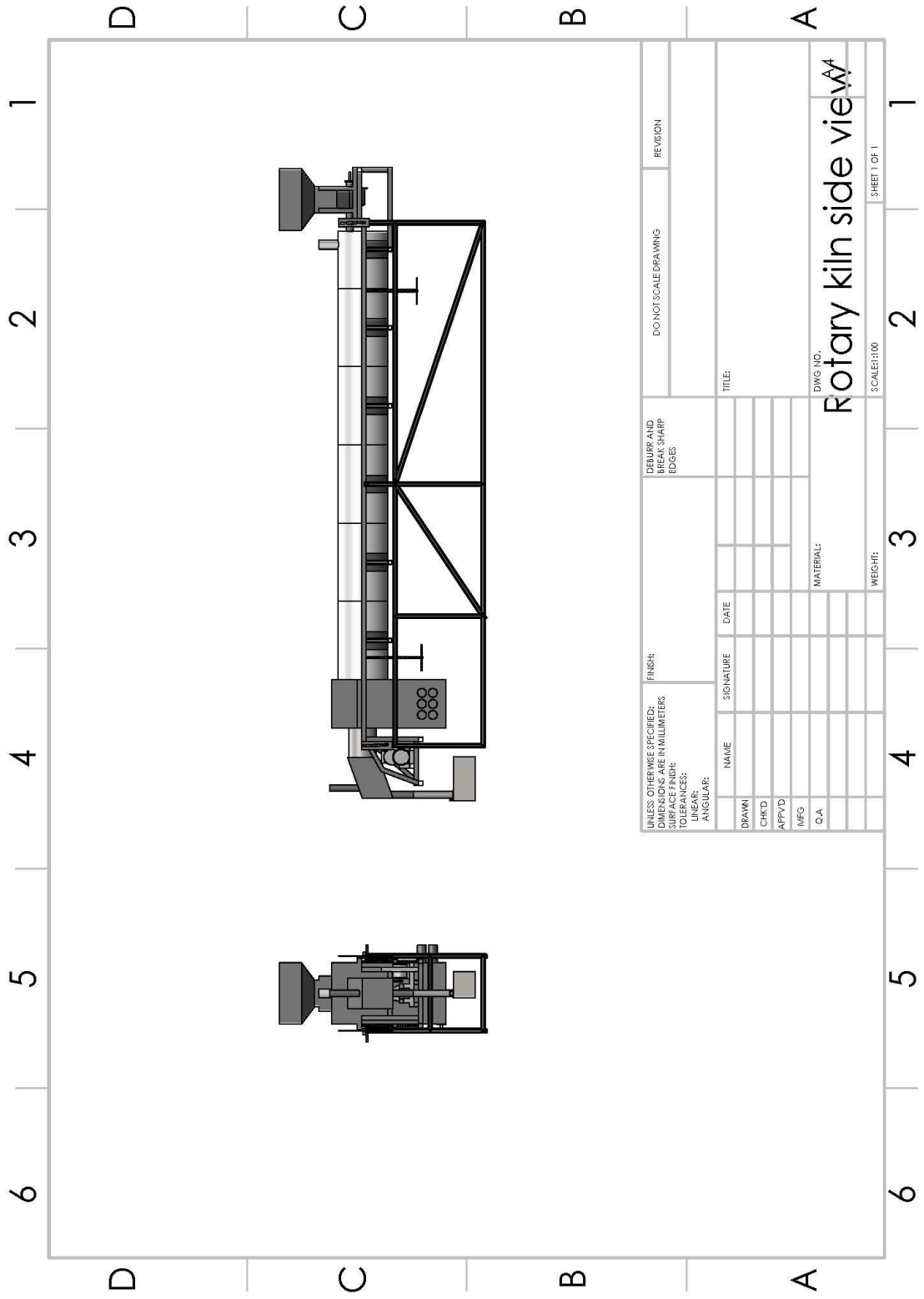
rpm	อุณหภูมิ	mass yield	energy yield	energy yield average	sd	error
1	230	42.20	63.56	63.90	1.81817	1.348396
	230		65.86			
	230		62.27			
	250	36.48	56.05	57.37	1.32915	1.152888
	250		57.37			
	250		58.70			
	270	30.60	47.01	47.76	1.620028	1.272803
	270		49.62			
	270		46.64			
2	230	43.63	67.83	66.91	1.311583	2.290487
	230		65.98			
	230		66.91			
	250	36.67	58.34	58.34	0	0
	250		58.34			
	250		58.34			
	270	33.50	57.98	57.98	1.150838	1.072771
	270		57.17			
	270		58.79			
3	230	46.08	71.64	71.27	0.427491	0.653828
	230		71.36			
	230		70.80			
	250	36.69	59.49	60.75	3.200469	1.788985
	250		64.39			
	250		58.38			
	270	34.18	59.16	58.75	0.587156	0.766261
	270		58.33			
	270		58.75			



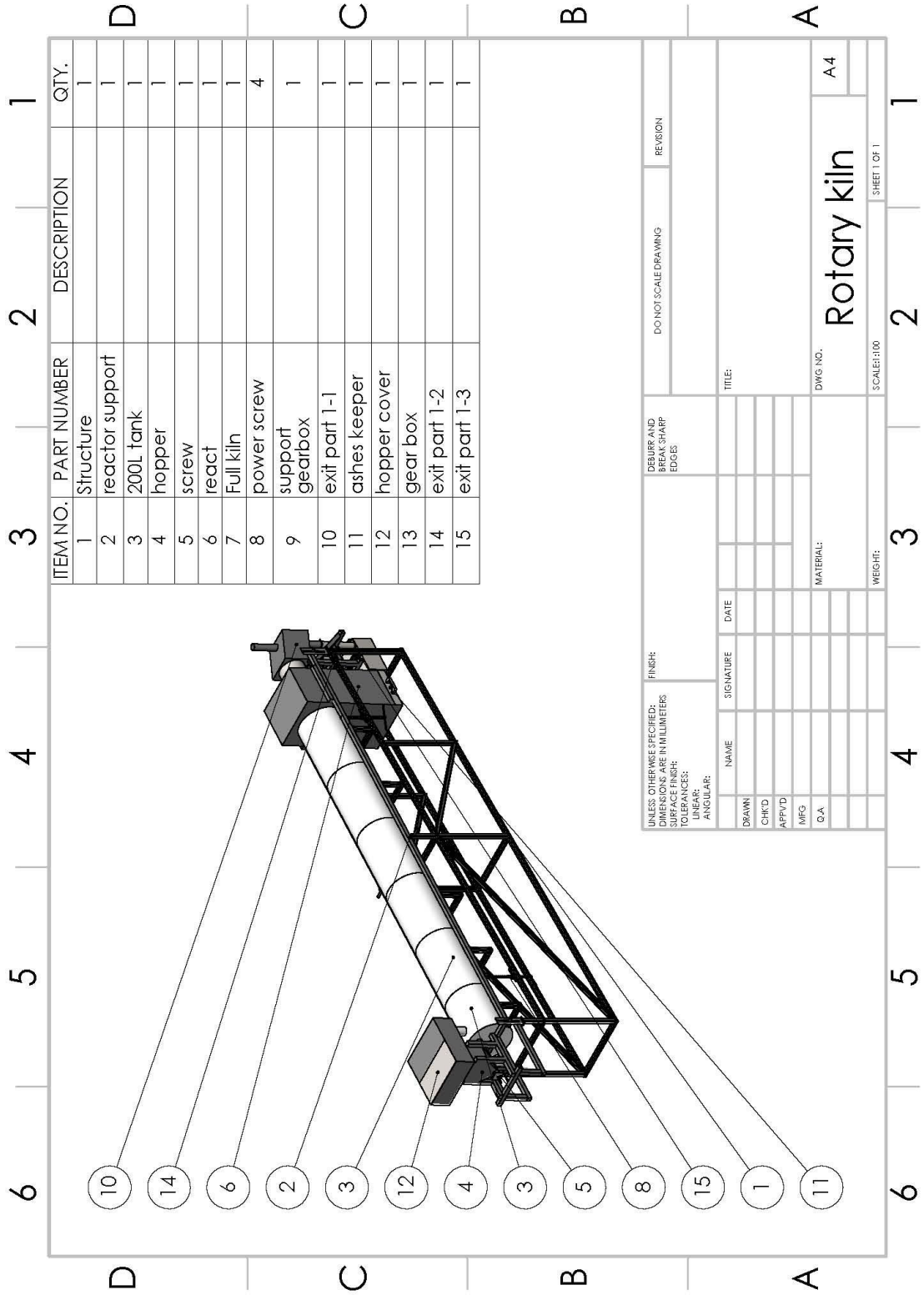
ภาคผนวก จ
เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:				DEBURR AND BREAK SHARP EDGES:			
TOLERANCES:				TITLE:			
LINEAR:				DRAWN:			
ANGULAR:				CHKD:			
				APPVD:			
				MFG:			
				C.A.:			
				SIGNATURE			
				DATE			
				MATERIAL:		DWC NO. Rotary kiln iso view^{A4}	
				WEIGHT:		SCALE: 1:100	
				SHEET 1 OF 1			

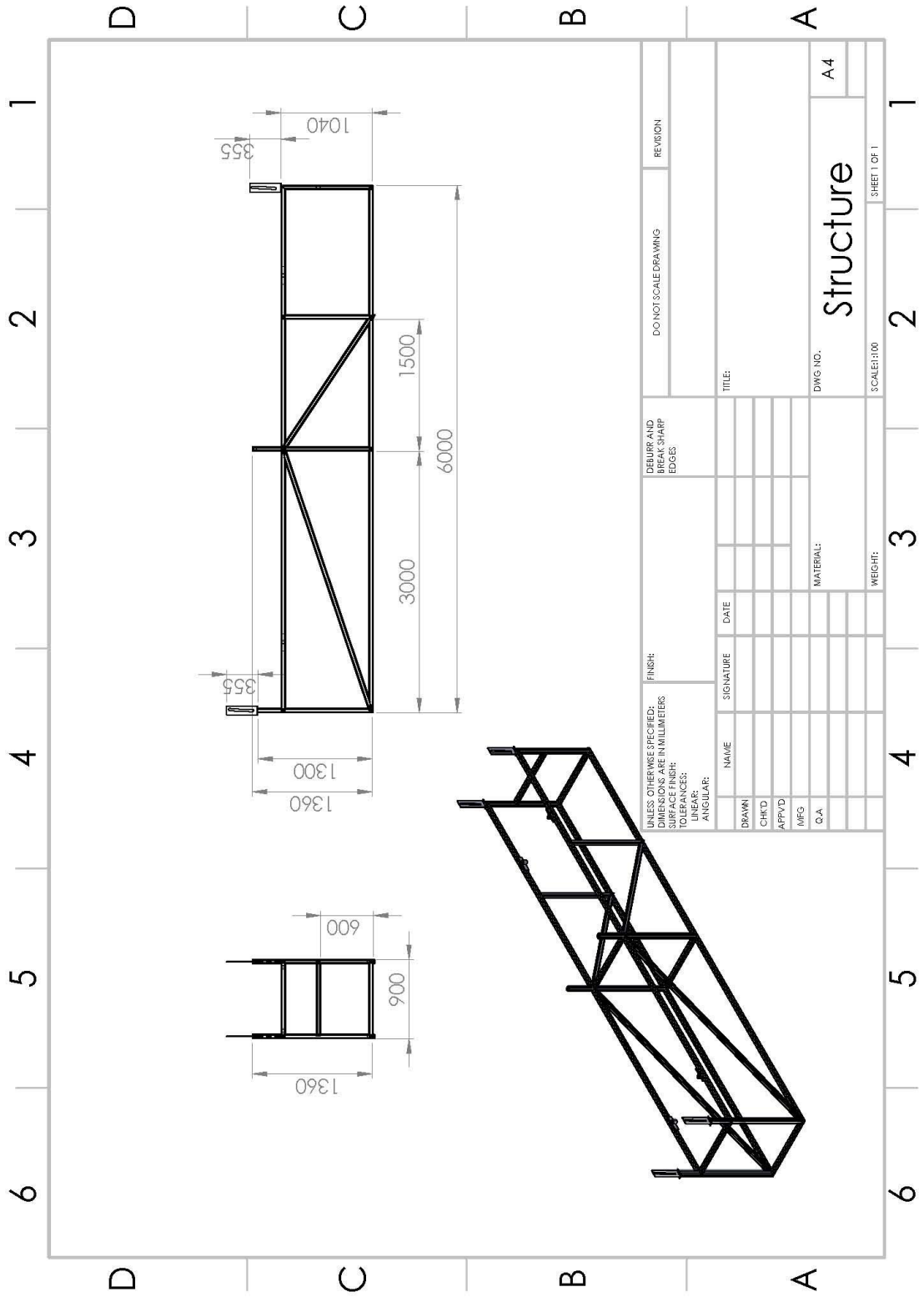


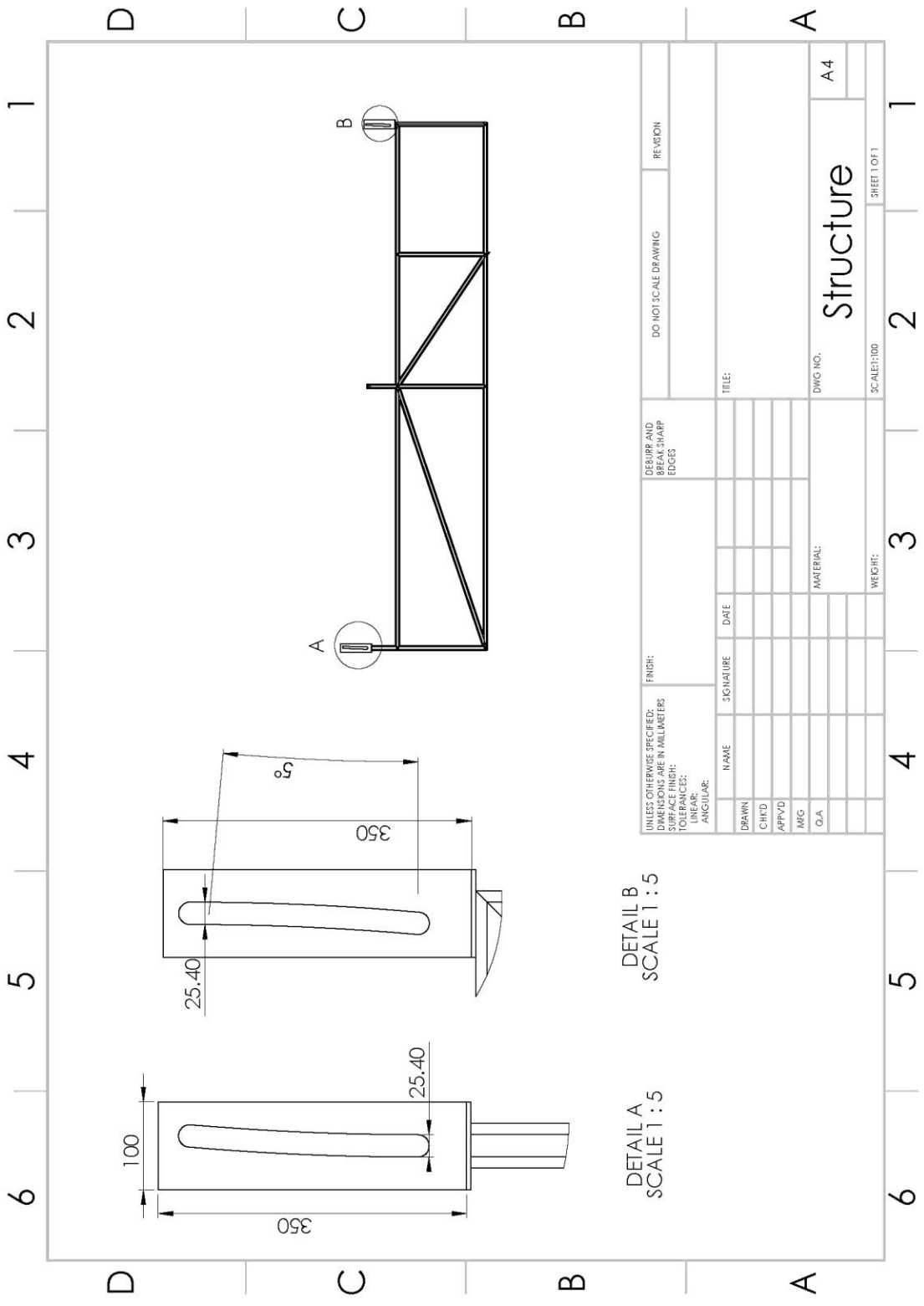
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:					
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A.				MATERIAL:					
				DWG. NO. Rotary kiln side view					
				SCALER:100					
				WEIGHT:					
				SHEET 1 OF 1					



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Structure		1
2	reactor support		1
3	200L tank		1
4	hopper		1
5	screw		1
6	react		1
7	Full kiln		1
8	power screw		4
9	support gearbox		1
10	exit part 1-1		1
11	ashes keeper		1
12	hopper cover		1
13	gear box		1
14	exit part 1-2		1
15	exit part 1-3		1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:		BREAK SHARP EDGES:					
TOLERANCES:							
LINEAR:							
ANGULAR:							
DRANN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:			
CHK'D							
APP'VD							
MFG							
Q.A.							
				MATERIAL:			
				DWG NO. A4			
				Rotary kiln			
				SCALE: 1:100			
				WEIGHT:			
				SHEET 1 OF 1			

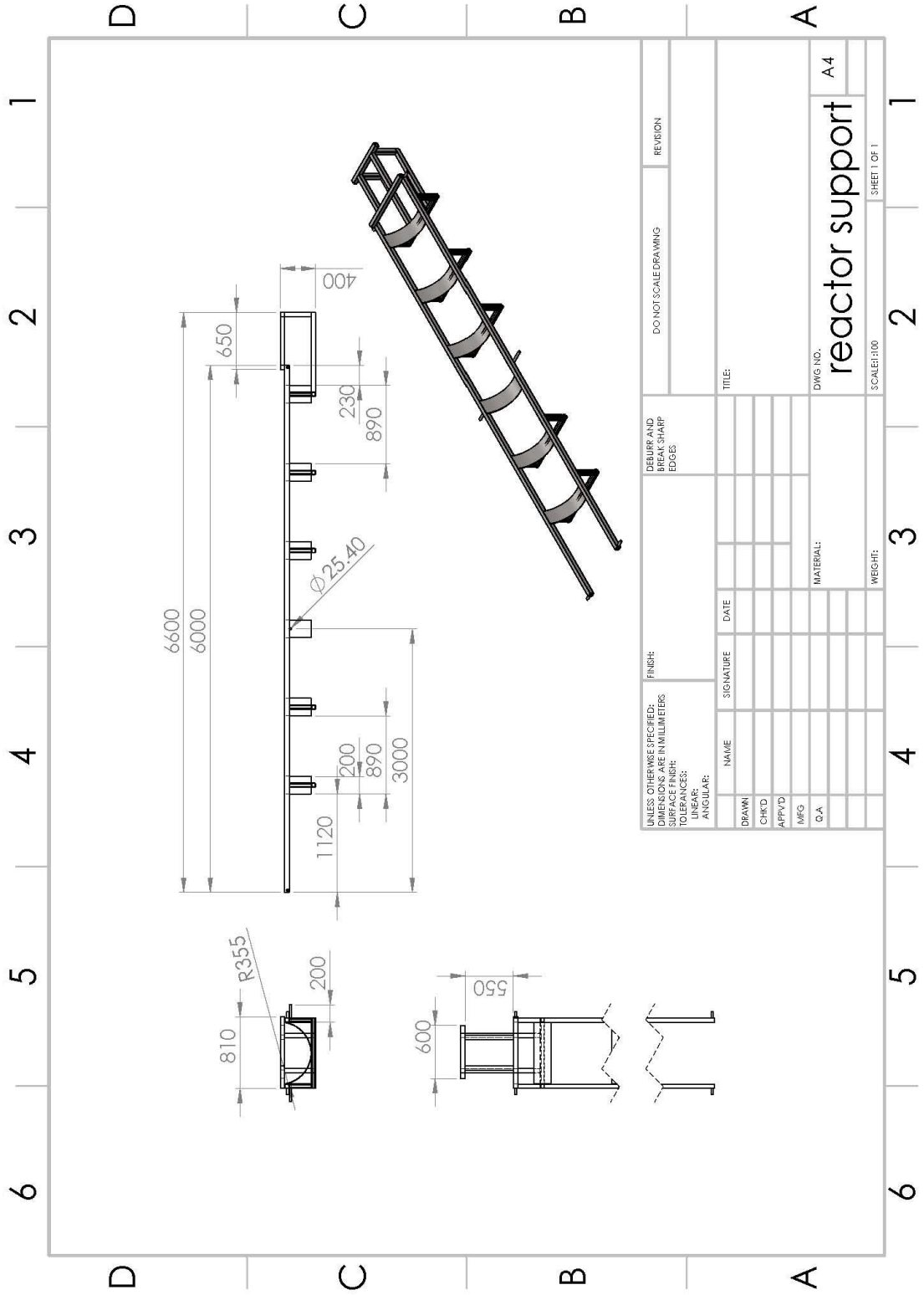


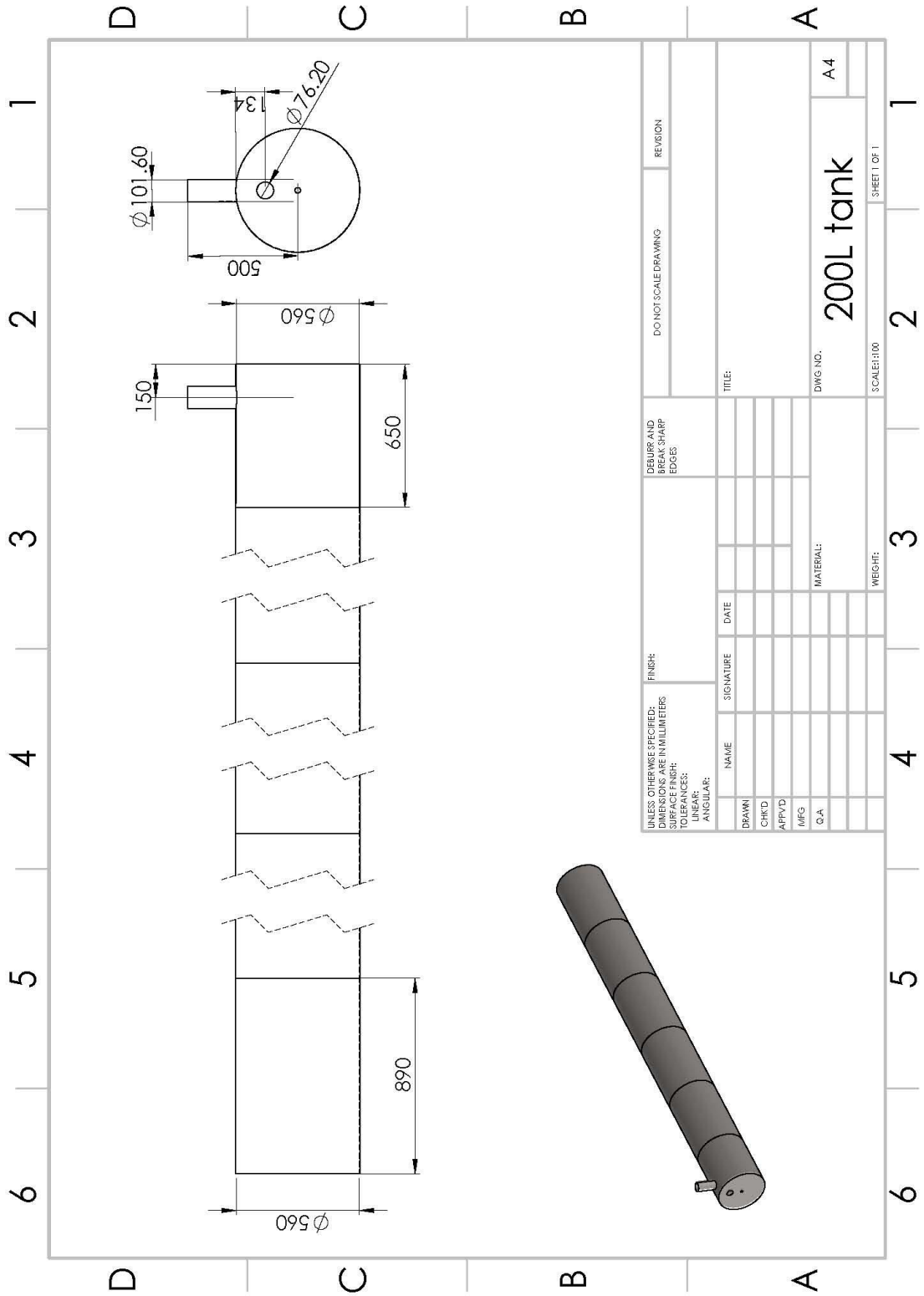


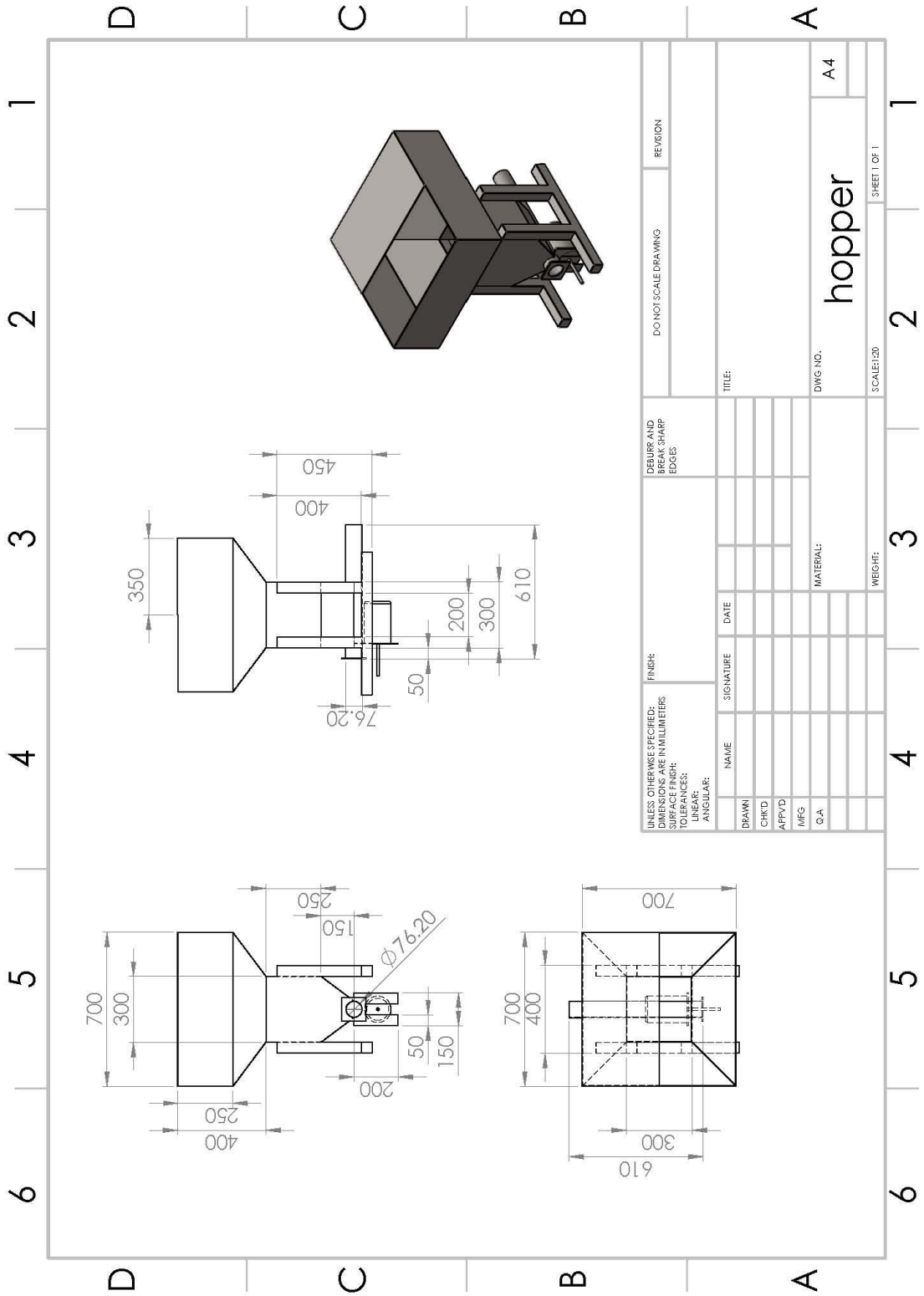
DETAIL B
SCALE 1 : 5

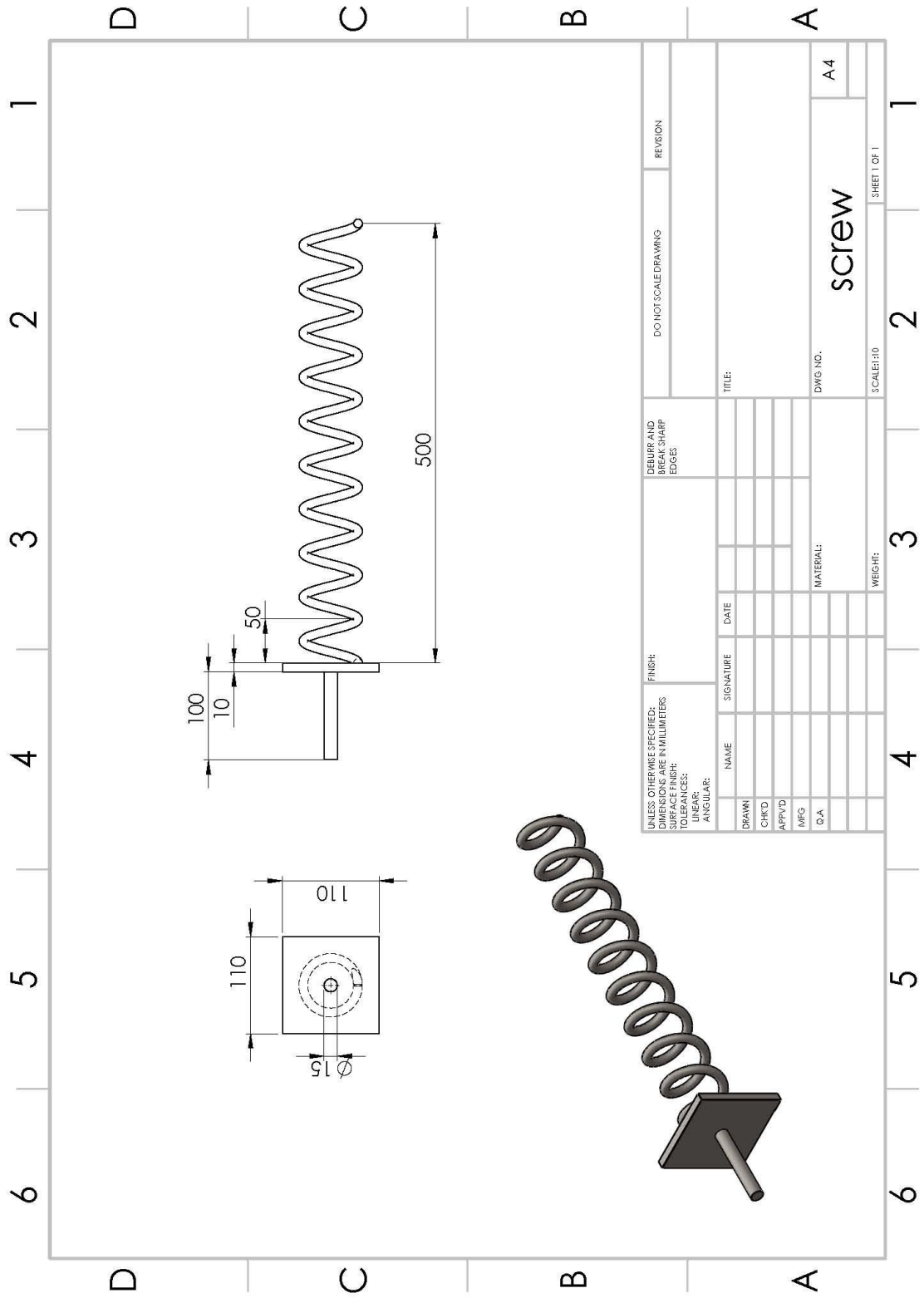
DETAIL A
SCALE 1 : 5

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:		TOLERANCES:		LINEAR:		ANGULAR:		TITLE:	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL:		DWG NO.		A4	
CHKD						Structure		1	
APPYD						SCALE: 1:100		SHEET 1 OF 1	
WEG						WEIGHT:		3	
D.A.								4	
								5	
								6	

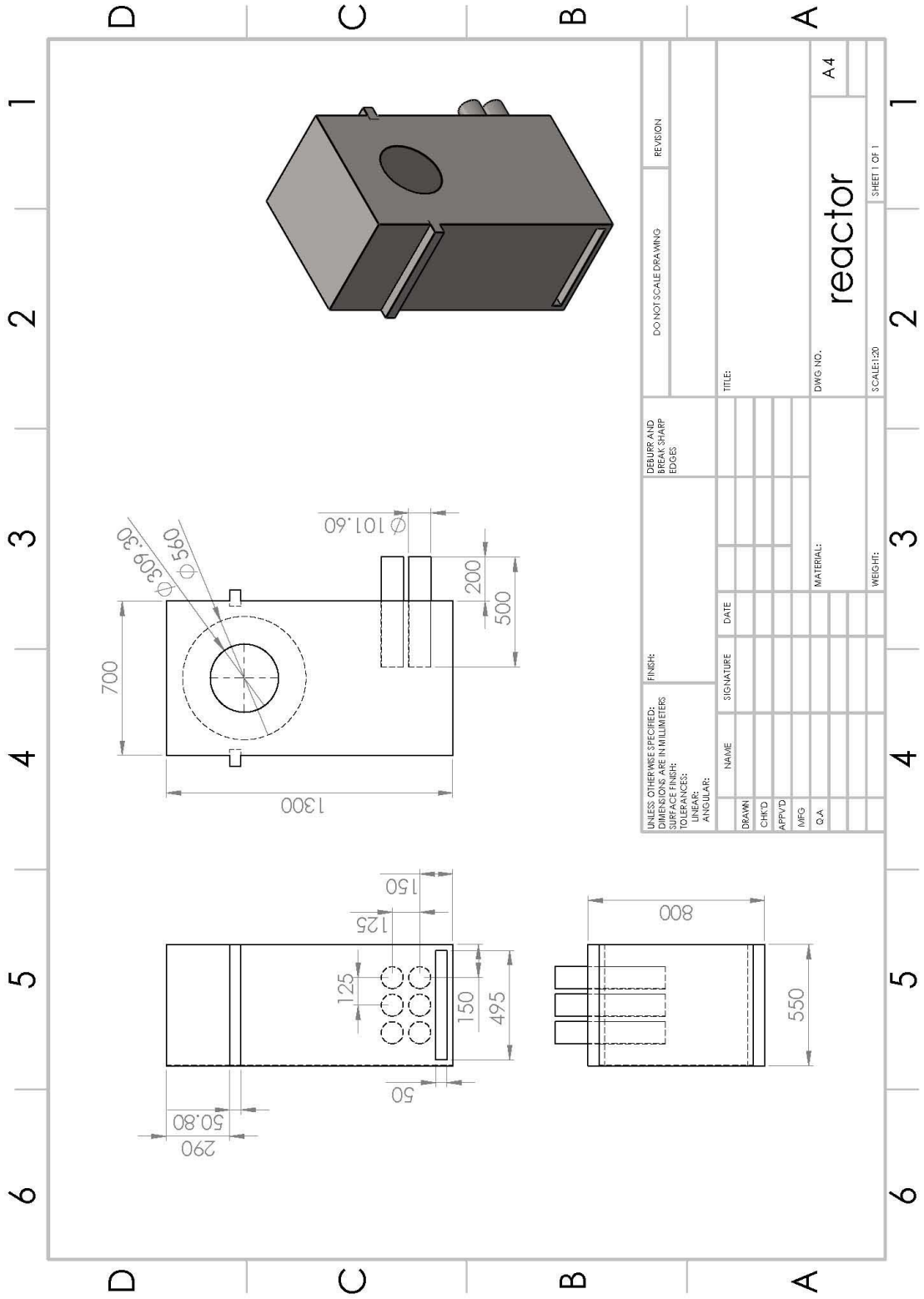


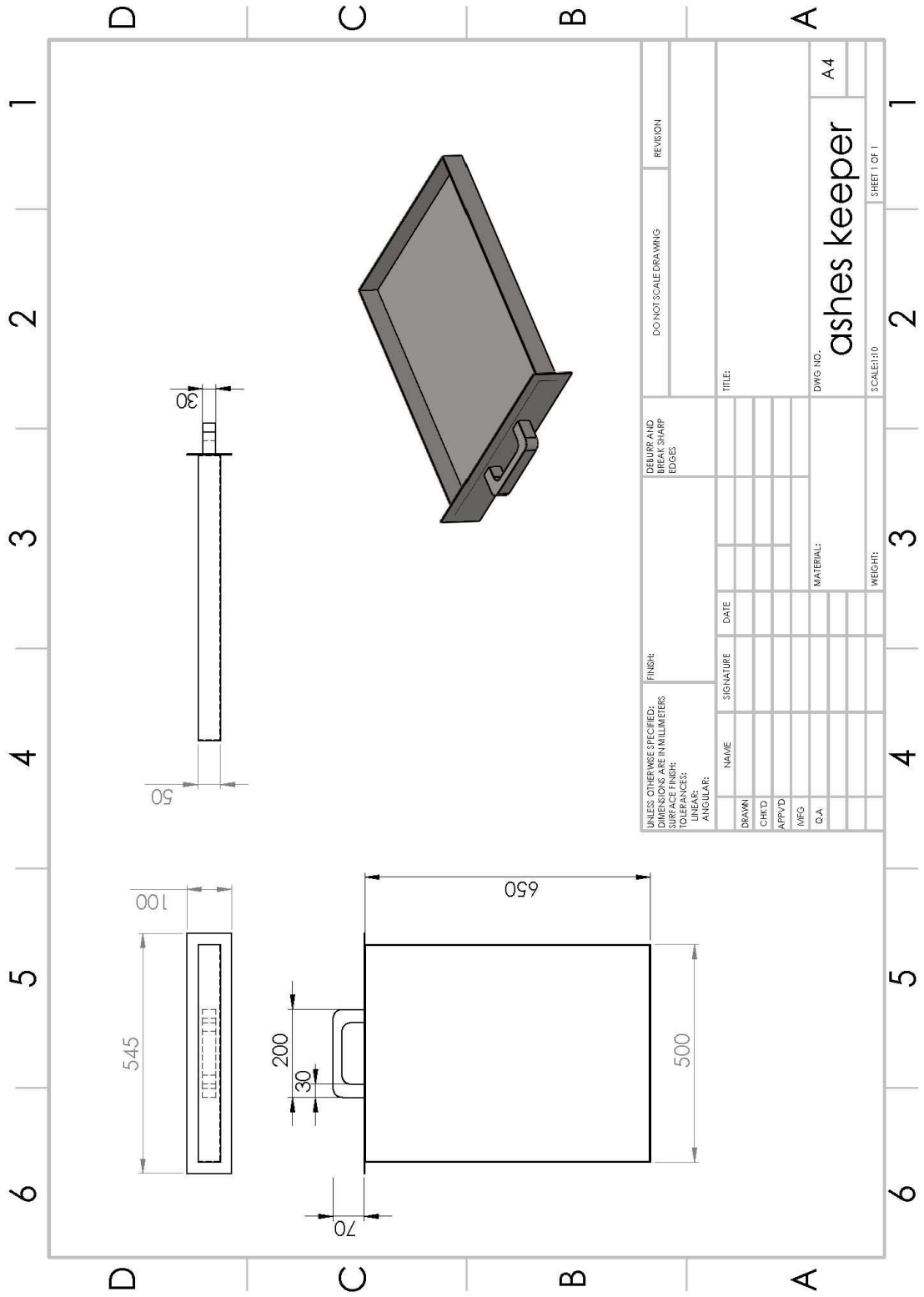


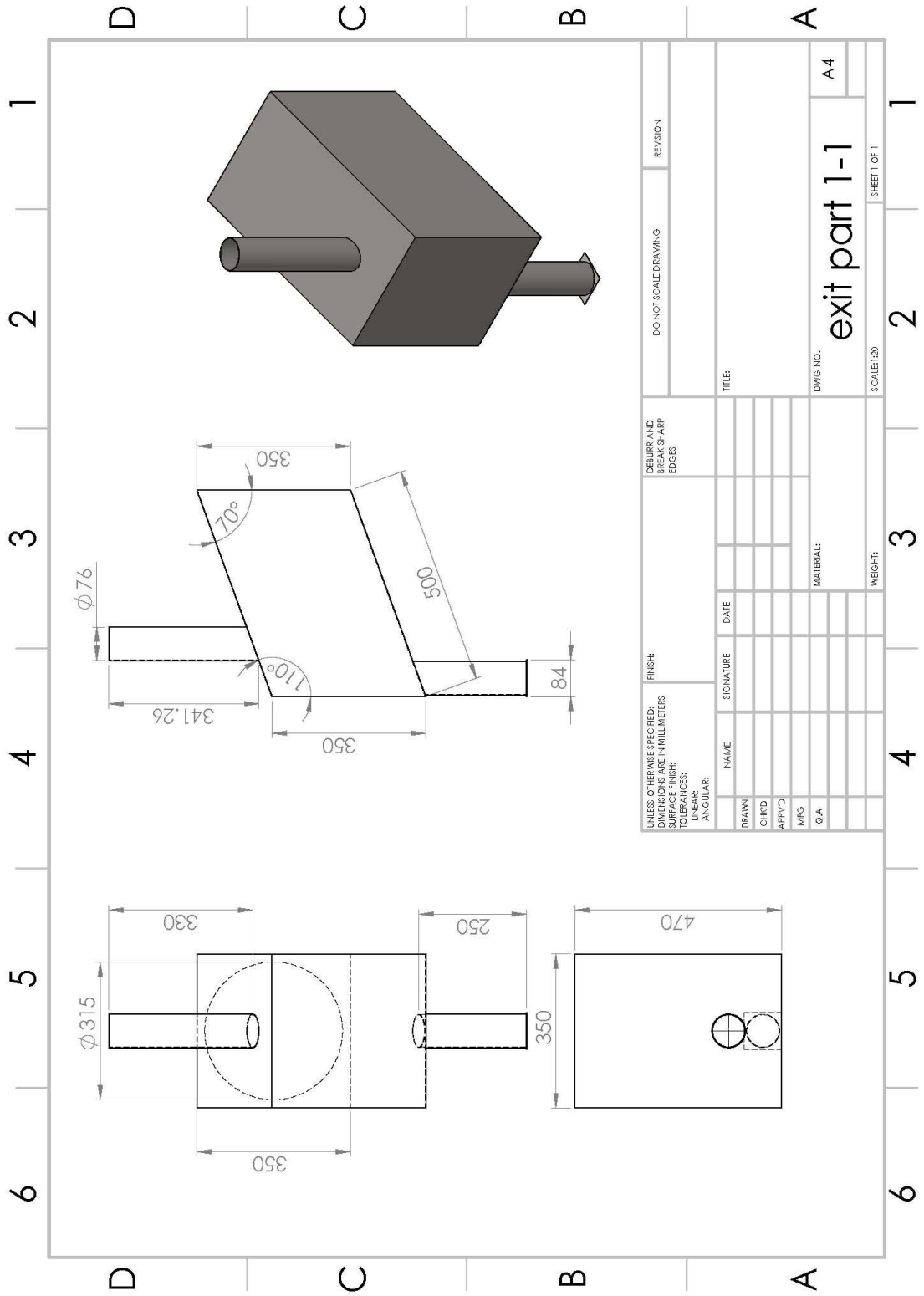


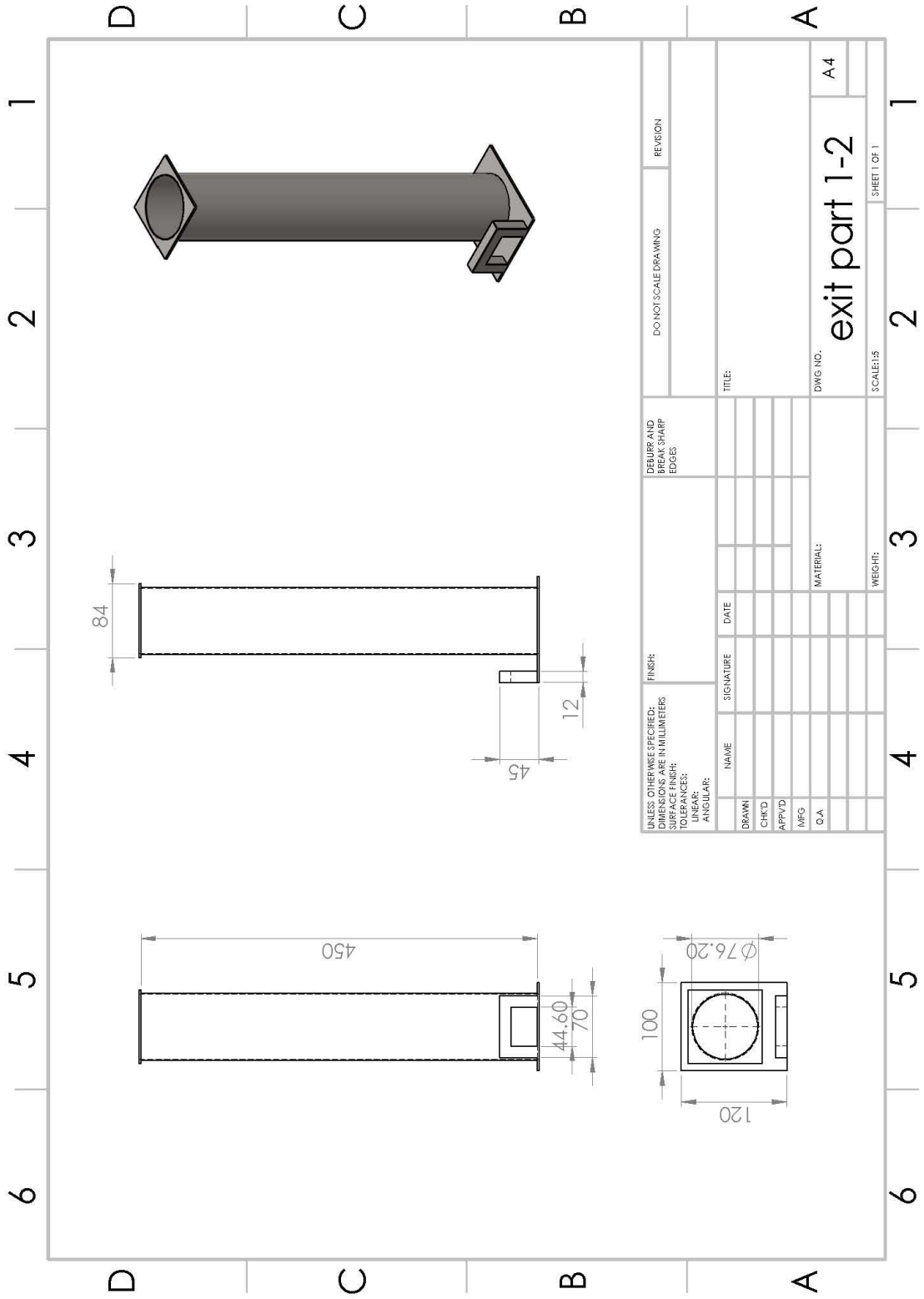


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:		TOLERANCES:		NAME		SIGNATURE		DATE	
LINEAR:		ANGULAR:		DRANN		CHKD		APPRVD	
				MFG		D.A.		MATERIAL:	
								DWG NO. screw	
								A4	
								SCALE: 1:10	
								WEIGHT:	
								SHEET 1 OF 1	

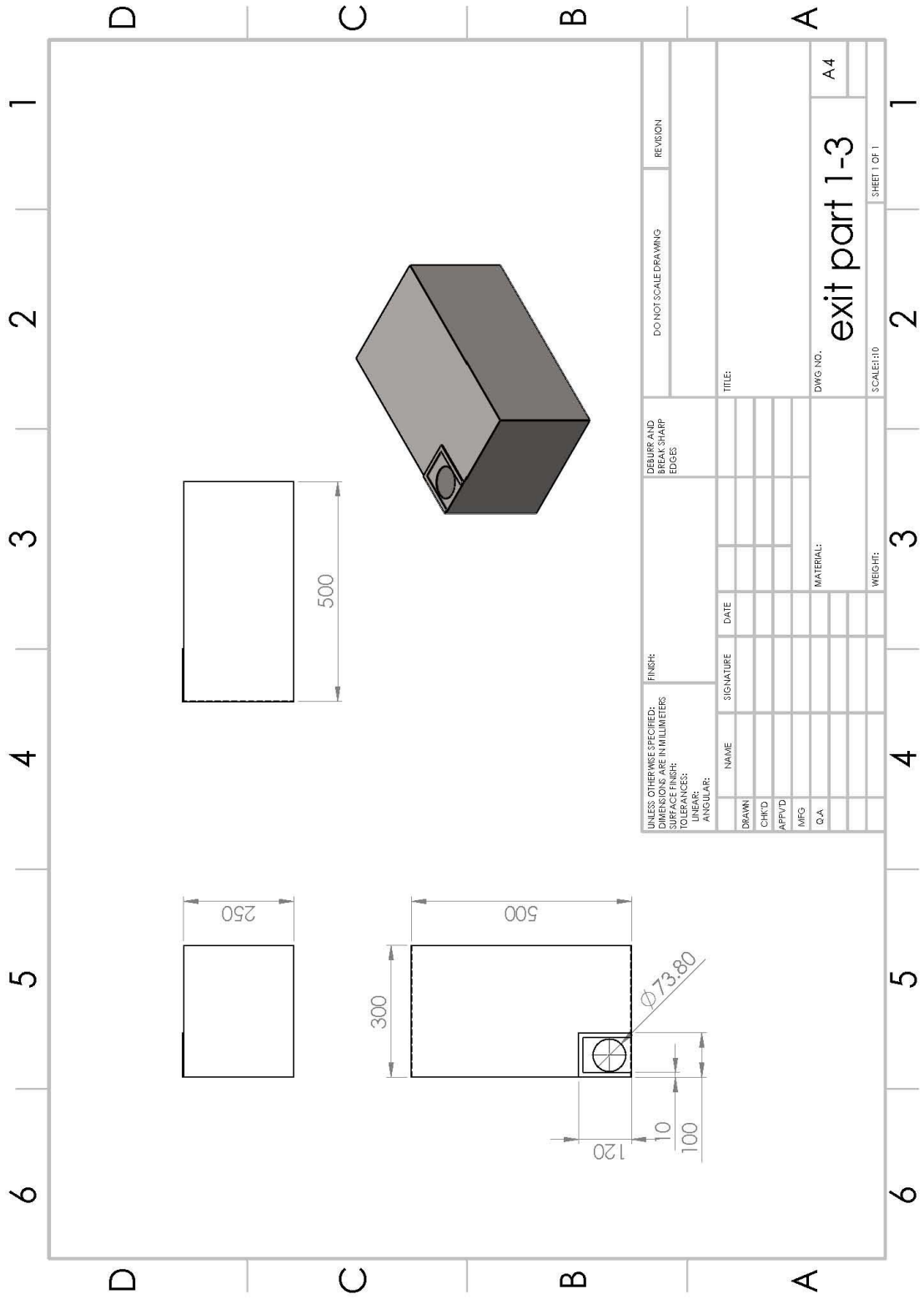




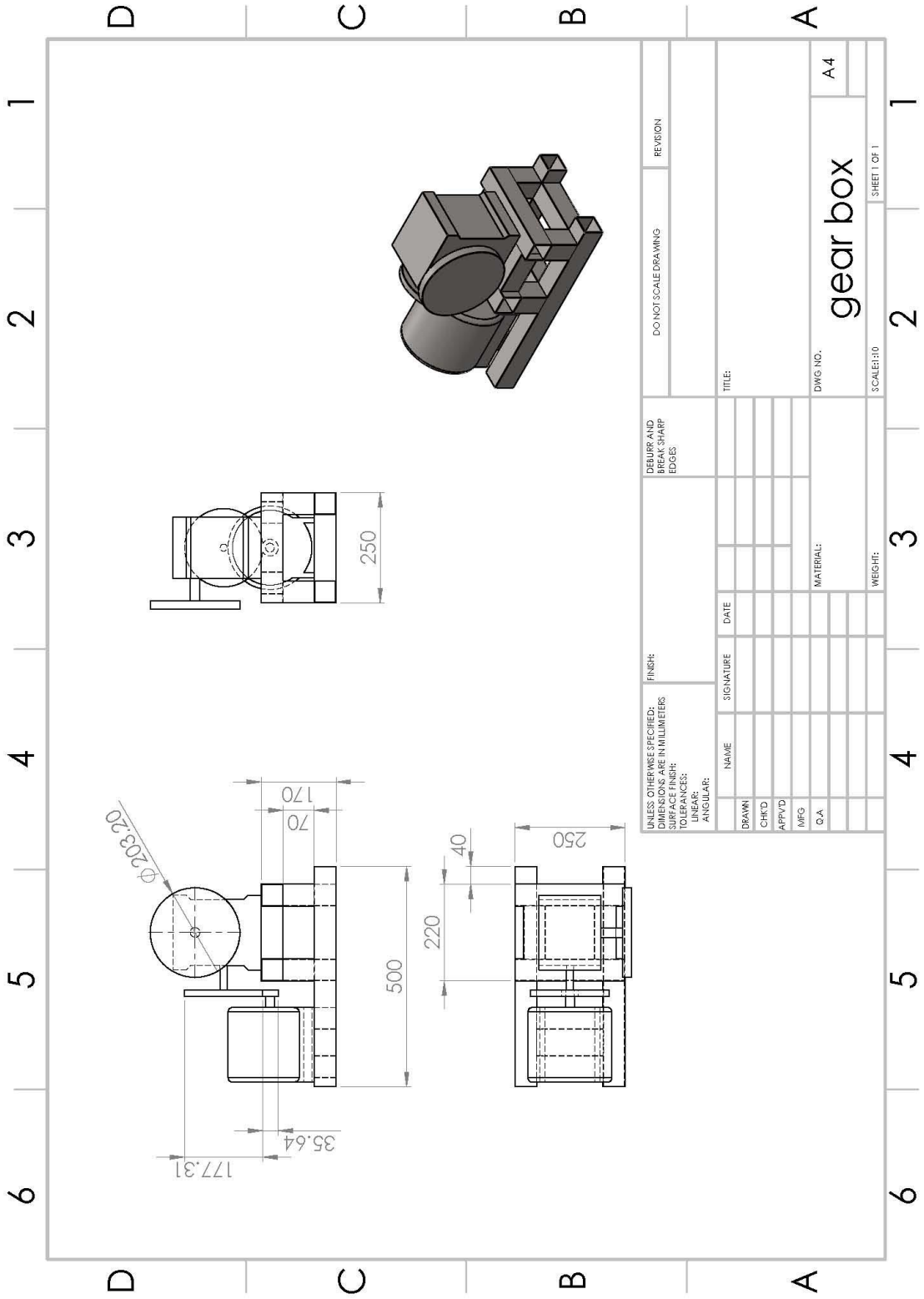


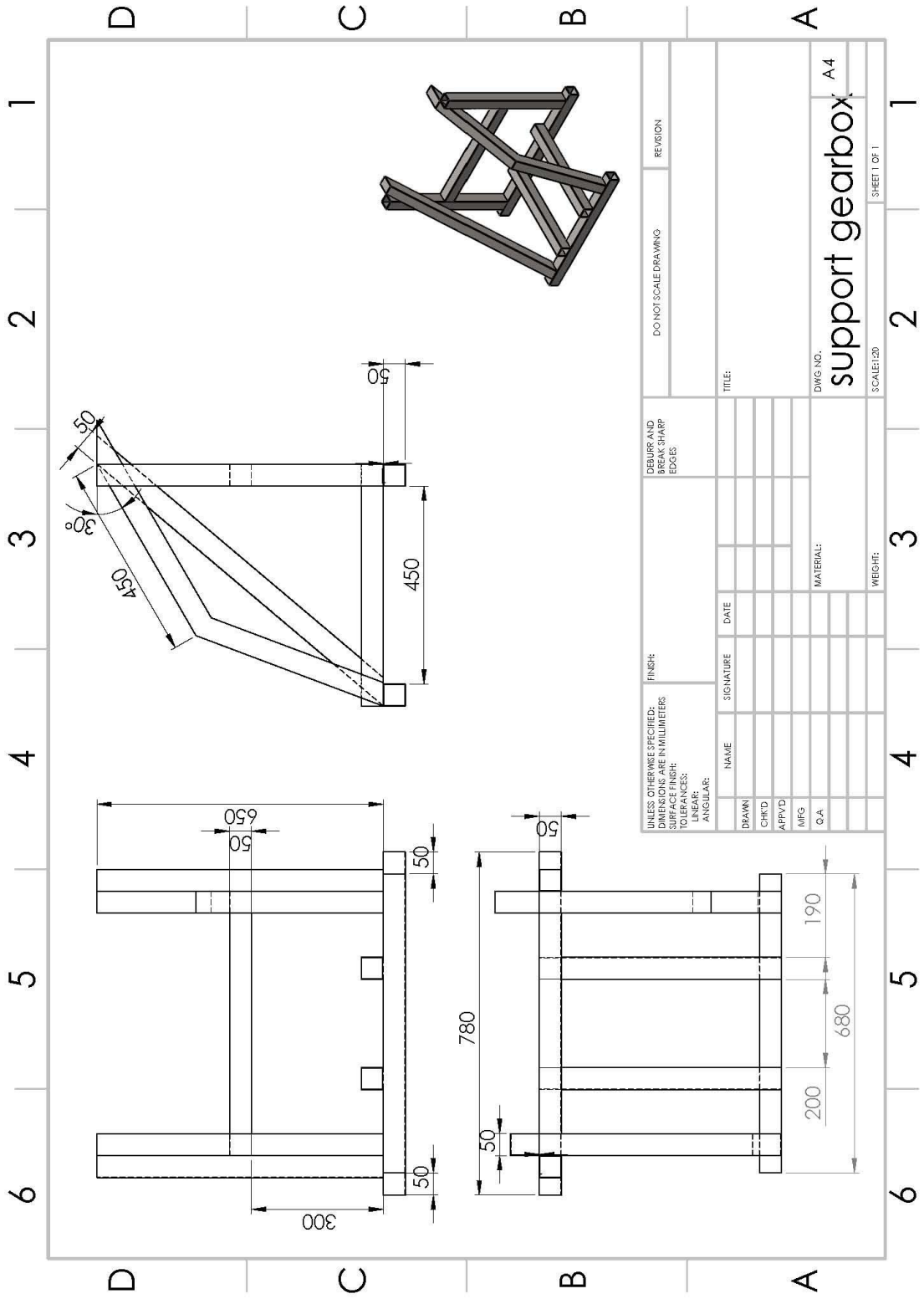


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:		TOLERANCES:		NAME		SIGNATURE		DATE	
LINEAR:		ANGULAR:		DRAWN		CHK'D		APP'VD	
				MFG		D.A.		MATERIAL:	
				TITLE:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRANN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:		DWG NO.		A4	
CHK'D						exit part 1-3			
APP'VD						SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1	
MFG						WEIGHT:			
Q.A.						MATERIAL:			





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล
วัน เดือน ปี เกิด	23 กันยายน 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนยอแซฟอุปถัมภ์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนยอแซฟอุปถัมภ์ ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	207/222 ซอยเพชรเกษม 112 แขวงหนองค้างพลู เขตของแวม กรุงเทพมหานคร 10160

