



สมการสหสัมพันธ์ของระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

สมการสหสัมพันธ์ของระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการ
ทอรีแฟคชั่น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

THE CORRELATION OF MEAN RESIDENCE TIME OF TORREFIED BIOMASS
ROTARY KILN



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Doctor of Philosophy ENERGY ENGINEERING
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2021
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ สมการสหสัมพันธ์ของระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบ
หมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น
โดย นายณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาคุณภิวัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ธาราวดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพาพร คำแดง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ธาราวดี)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ดร. ณัฐ รัชยะพงษ์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระนุช อินทะกัณฑ์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร. นิติงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์)

61406801 : วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต

คำสำคัญ : ชีวมวล, กระบวนการทอรีแฟคชั่น, เตาเผาแบบหมุน, ระยะเวลาการดำเนินการ, สมการสหสัมพันธ์

นาย ญัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล: สมการสหสัมพันธ์ของระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐภูมิ ธาราวดี

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอรีไฟร์ และศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนเพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน กะลาปาล์มถูกใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลหลังกระบวนการทอรีแฟคชั่น ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่น และ ความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทอรีไฟร์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นคือ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนเตาคือ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที โดยในงานวิจัยนี้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานได้ และศึกษาผลของความเร็วยรอบการหมุน มุมโน้มเอียง อัตราการป้อนเชิงปริมาตร จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน ความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา (อัตราส่วนสนทัด) ที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าชีวมวลหลังจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าชีวมวลดิบ โดยเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานมีค่าลดลง และพบว่าเมื่อความเร็วยรอบการหมุน มุมโน้มเอียง อัตราการป้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนลดลง และพบว่าสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสามารถทำนายระยะเวลาการดำเนินการได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 12.54 เปอร์เซ็นต์

61406801 : Major ENERGY ENGINEERING

Keyword : biomass, torrefaction process, rotary kiln, residence time, correlation equation

MR. NATTARAT CHUTWIBOONKUN : THE CORRELATION OF MEAN RESIDENCE TIME OF TORREFIED BIOMASS ROTARY KILN THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. NATTAWUT THARAWADEE

This research was studied the effect of torrefaction process on properties of biomass and studied the effect of variable on residence time of rotary kiln for generated the correlation equation for predict the residence time pf rotary kiln. The palm kernel shell was used for studied the properties of biomass after torrefaction process. In this research, the effect of torrefaction temperature and rotation speed of rotary kiln on properties of biomass was investigated. Torrefaction temperature was 230, 250 and 270 degree Celsius. The rotational speed was 1, 2 and 3 round per minute. Product yield, particle distribution, mass yield and energy yield were investigated. The rotational speed, inclinational angle, volumetric feed rate, number of lifter and length per diameter of rotary (aspect ratio) on residence time were investigated. It was concluded that, the properties of biomass after torrefaction process was better than raw biomass. The higher heating value was increase when the torrefaction temperature increase. On the other hand, the mass yield and energy yield were decrease. The residence time was decrease when the rotational speed, inclination angle and volumetric feed rate increase. The correlation equation can used for predict the residence time of rotary kiln. The error of correlation equation was 12.54 percent.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับการดูแลเอาใจใส่ และได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธาราวดี และได้รับคำแนะนำให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและให้ข้อเสนอแนะจากกรรมการหลายๆท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร.นิติ พงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระนุช อินทะกันท์ และ อาจารย์ ดร.ณัฐ ธีชยะพงศ์ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความกรุณาของอาจารย์ทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปปรับแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญ ที่สละเวลาในการตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย ตรวจทานความถูกต้องของภาษาในการจัดพิมพ์เล่มวิทยานิพนธ์เล่มนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับความช่วยเหลือและกำลังใจจากคุณแม่ พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้วิจัยไม่อาจกล่าวนามได้หมด ผู้วิจัยรู้สึกขอบคุณในความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบคุณมาไว้ ณ โอกาสนี้

นาย ณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	3
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย.....	4
1.7 คำจำกัดของงานวิจัย.....	4
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ชีวมวล.....	5
2.1.1 ชนิดของชีวมวล.....	5
2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	6
2.1.3 การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล.....	7
2.2 กระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction).....	8

2.2.1	หลักการทํางานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น	11
2.3	ผลของชีวมวลที่ผ่านการกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	13
2.3.1	ค่าความร้อน (Heating Value).....	13
2.3.2	ค่าความชื้น (Moisture content).....	15
2.3.3	ความหนาแน่นบักก์ (Bulk density)	16
2.3.4	ค่าความทนทาน (Durability).....	17
2.3.5	การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle distribution).....	18
2.3.6	ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic).....	18
2.3.7	การวิเคราะห์ประมาณและแบบแยกธาตุ (Proximate and ultimate analysis).....	18
2.4	เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln).....	19
2.4.1	ลักษณะทั่วไปของเตาเผาแบบหมุน	19
2.4.2	ชนิดของเตาเผาแบบหมุน.....	19
2.4.3	ส่วนประกอบของเตาเผาแบบหมุน.....	23
2.4.4	การใช้งานเตาเผาแบบหมุน	25
2.4.5	การถ่ายเทความร้อนของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุน	25
2.5	เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	26
2.6	แก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น (torrefaction gas).....	28
2.7	ส่วนประกอบของแก๊สที่ถูกควบแน่น.....	29
2.8	ส่วนประกอบของแก๊สที่ไม่ถูกควบแน่น.....	30
2.9	สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
2.10	ระยะเวลาในการดำเนินการโดยเฉลี่ย (Mean Resident Time, MRT).....	30
2.10.1	ความหมายของระยะเวลาในการดำเนินการโดยเฉลี่ย.....	30
2.10.2	ปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ย.....	31
2.11	ทฤษฎีบีคิงแฮม-พาย (Buckingham pi theorem).....	37

2.12	วิธีการและสมการที่ใช้ในการหาระยะเวลาในการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน	39
2.13	สมการที่ใช้ในการหาระยะเวลาในการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน.....	50
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1	เครื่องมือสำหรับงานวิจัย.....	54
3.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล.....	54
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	55
3.2	สถานที่ทำการวิจัย	58
3.3	การวางแผนงานวิจัย	58
3.3.1	แผนการดำเนินงาน	58
3.3.2	แผนการทดลอง.....	60
3.4	ขั้นตอนการทดลอง.....	61
3.4.1	กระบวนการทอรีแฟคชั่นและ.....	61
3.4.2	การควบคุมแน่นแก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	61
3.4.3	ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	62
3.5	การบันทึกและวัดค่ามุมรีโพส (Angle of repose).....	64
3.6	การหาพื้นที่หน้าตัดของวัสดุบนใบกวน	65
3.7	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	68
3.7.1	การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	68
3.7.2	การวิเคราะห์ผลของลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	69
3.7.3	การวิเคราะห์ผลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	69
3.7.4	การวิเคราะห์ผลของค่าความร้อนของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	69
3.7.5	การวิเคราะห์ผลของค่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน	71

3.7.6 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรในการดำเนินงานที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของ เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	71
3.7.7 การวิเคราะห์การสร้างสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตา แบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	72
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง	73
4.1 คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุน	73
4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้	73
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	74
4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของของเหลวที่ผ่านกระบวนการควบแน่น.....	76
4.1.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค	77
4.1.5 ค่าความร้อน.....	80
4.1.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น..	81
4.2 ผลของตัวแปรที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน	84
4.2.1 ผลของความเร็รรอบที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน.....	84
4.2.2 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน.....	87
4.2.3 ผลของใบกวนที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน	90
4.2.4 ผลของอัตราการป้อนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน	93
4.2.5 ผลของอัตราส่วนสั่นที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน	94
4.3 สมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน.....	95
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	100
5.1 สรุปผลการทดลอง	100
5.1.1 คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	100
5.1.2 ผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการ	100
5.1.3 สมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน.....	101

5.2 ข้อเสนอแนะ 101

รายการสัญลักษณ์..... 102

รายการอ้างอิง..... 105

ภาคผนวก ก คุณสมบัติของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น 110

ภาคผนวก ข ระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน..... 118

ภาคผนวก ค การสร้างสมการสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน
..... 158

ประวัติผู้เขียน 163



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ.....	34
ตารางที่ 2.2 มิติของปริมาณทางกายภาพและหน่วยในระบบ SI.....	38
ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองผลของมุมโน้มเอียงเตาที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการ.....	39
ตารางที่ 2.4 ผลการทดลองผลของอัตราการป้อนชีวมวลที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการ	40
ตารางที่ 2.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาในการดำเนินการกับความเร็รรอบ 2.0 และ 2.8 รอบต่อนาที.....	40
ตารางที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาในการดำเนินการกับเส้นผ่านศูนย์กลางเตาขนาด 6 นิ้ว และ 19 $\frac{1}{4}$ นิ้ว	41
ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ K และค่ามุมรีโพล	42
ตารางที่ 2.8 รายละเอียดจุดกั้นทางออกชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง	44
ตารางที่ 2.9 ผลของมุมโน้มเอียงเตาและความเร็รรอบในการหมุนของเตาที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการดำเนินการและค่าการกองตัวของวัสดุ	44
ตารางที่ 2.10 ผลของระยะเวลาในการดำเนินการและค่าการกองตัวของวัสดุที่อัตราการป้อนและรูปแบบของจุดกั้นทางออกที่ต่างกัน ที่มุมโน้มเอียงเตา 1.5 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางเตา 300 มิลลิเมตร และความเร็รรอบในการหมุน 0.6 รอบต่อนาที	46
ตารางที่ 2.11 ผลของระยะเวลาในการดำเนินการและค่าการกองตัวของวัสดุที่อัตราการป้อนและรูปแบบของจุดกั้นทางออกที่ต่างกัน ที่มุมโน้มเอียงเตา 1.5 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางเตา 500 มิลลิเมตร และความเร็รรอบในการหมุน 0.6 รอบต่อนาที	47
ตารางที่ 2.12 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมการ	52
ตารางที่ 3.1 จำนวนการทดลอง	61
ตารางที่ 4.1 ผลได้ของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	74
ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	81

สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่น	12
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อน.....	13
รูปที่ 2.3 บอมบ์แคลอริมิเตอร์.....	13
รูปที่ 2.4 ตู้อบลมร้อน.....	16
รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบค่าความหนาแน่นบักก์.....	17
รูปที่ 2.6 เครื่องวัดความหนาทาน.....	17
รูปที่ 2.7 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค.....	18
รูปที่ 2.8 เตาเผาชนิดเปียก (Wet Kilns).....	20
รูปที่ 2.9 เตาเผาแบบแห้งชนิดยาว (Long Dry Kilns).....	20
รูปที่ 2.10 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kilns).....	21
รูปที่ 2.11 เตาเผาแบบ Cooler and Dryer.....	22
รูปที่ 2.12 เตาเผาแบบ Indirect fired.....	23
รูปที่ 2.13 เส้นทางการแลกเปลี่ยนความร้อนของชั้นวัสดุ.....	26
รูปที่ 2.14 รูปการออกแบบของระบบเตาทอรีแฟคชั่นแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการสำหรับกระบวนการ ทอรีแฟคชั่นไม้ซีดาร์	27
รูปที่ 2.15รูปแสดงแผนผังเตาทอรีแฟคชั่นแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการสำหรับกระบวนการทอรี แฟคชั่น beech chips	27
รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของแก๊สทอรีไฟร์ที่ถูกควบแน่น และ ไม้ถูกควบแน่น	28
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของแก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ถูกควบแน่นและไม้ถูกควบแน่น.....	29
รูปที่ 2.18 เตาเผาชนิดโรตารีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
รูปที่ 2.19 ขนาดของเตาเผาชนิดโรตารีที่ใช้ในการทดลอง.....	32

รูปที่ 2.20 ผลของความเร็วยรอบในการหมุนของเตาเผา (n) และอัตราการป้อน (M) ที่ส่งผลต่อค่า ระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ย	33
รูปที่ 2.21 แบบของอุปกรณ์ทดสอบ รวมถึงโครงสร้างและรูปร่างของใบกวน	34
รูปที่ 2.22 เตาเผาแบบหมุนสำหรับทดสอบซึ่งติดตั้งลิฟเตอร์.....	34
รูปที่ 2.23 ผลของตัวแปรที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการ.....	35
รูปที่ 2.24 อุปกรณ์วัดมุมรีโพล	41
รูปที่ 2.25 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการที่	48
รูปที่ 2.26 ผลของอัตราการป้อนที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการที่รูปแบบจุดกั้นทางออกต่างๆ...49	49
รูปที่ 2.27 ผลของความยาวเตาที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการ.....	49
รูปที่ 3.1 เครื่องสับหยาบ.....	54
รูปที่ 3.2 เครื่องสับละเอียด	55
รูปที่ 3.3 เตาเผาแบบ fix bed สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น	55
รูปที่ 3.4 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น	56
รูปที่ 3.5 เครื่องทำน้ำเย็น (Cold Bath eyela cool ace ca-1111).....	57
รูปที่ 3.6 เครื่องควบแน่น.....	58
รูปที่ 3.7 แสดงแผนการวิจัยการสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน 59	59
รูปที่ 3.8 แผนการทดลองการสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน60	60
รูปที่ 3.9 กระบวนการทอรีแฟคชั่นและการควบแน่นแก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	62
รูปที่ 3.10 ลักษณะการติดตั้งใบกวนในเตาเผาแบบหมุน	63
รูปที่ 3.11 มุมของเตาเผาแบบหมุน.....	63
รูปที่ 3.12 การตั้งกล้องวิดีโอเพื่อบันทึกมุมรีโพลของวัสดุในเตาเผาแบบหมุน.....	64
รูปที่ 3.13 การหาค่ามุมรีโพลของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุน.....	64
รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงตัวแปรต่างๆภายในเตาเผาแบบหมุนและคุณลักษณะของการตกของวัสดุใน เตาเผาแบบหมุน	66

รูปที่ 3.15 ภาพตัดขวางของเตาเผาแบบหมุนเพื่อแสดงวัสดุบนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุนที่ R-1	67
รูปที่ 3.16 การหาค่า dynamic angle of repose ด้วยโปรแกรม Solidworks	67
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบวนการทอรีแฟคชั่น	74
รูปที่ 4.2 ซิวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	75
รูปที่ 4.3 ของเหลวที่ได้จากระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล	76
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที	77
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที	78
รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที	78
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส	79
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	79
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส	80
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน	82
รูปที่ 4.11 ผลของความเร็วรอบที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน	83
รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกะลาปาล์ม	85
รูปที่ 4.13 ผลของความเร็วรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลซังข้าวโพด	85
รูปที่ 4.14 ผลของความเร็วรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกระถิน	86
รูปที่ 4.15 ผลของความเร็วรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลแกลบ	86
รูปที่ 4.16 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกะลาปาล์ม	88
รูปที่ 4.17 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลซังข้าวโพด	88

รูปที่ 4.18 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกระถิน	89
รูปที่ 4.19 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลแกลบ	89
รูปที่ 4.20 ผลของจำนวนใบกวนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวล กะลาปาล์ม	91
รูปที่ 4.21 ผลของจำนวนใบกวนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลซึ่ง ข้าวโพด	91
รูปที่ 4.22 ผลของจำนวนใบกวนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวล กระถิน	92
รูปที่ 4.23 ผลของจำนวนใบกวนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวล แกลบ	92
รูปที่ 4.24 แสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของวัสดุในขณะที่ไม่มีใบกวนในเตาเผาและมีใบกวน ภายในเตาเผาแบบหมุน	93
รูปที่ 4.25 ผลของอัตราการป้อนที่มีผลต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน	94
รูปที่ 4.26 ผลของอัตราส่วนสั่นที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน	95
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาจาก การทำนาย	96
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาจาก การทำนาย	97
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาจาก การทำนายเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้า	98
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาจาก การทำนายเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้า	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่ได้จากมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันและถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งที่กล่าวมานั้นเป็นที่ทราบกันว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป ดังนั้นจึงมีความต้องการในการหาพลังงานเพื่อมาทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป หรือที่เรียกกันว่า พลังงานทดแทน หรือพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) เช่น พลังงานชีวมวล ซึ่งพลังงานชีวมวลนั้นเป็นพลังงานที่ได้จากอินทรีย์สารของพืชชนิดต่าง ๆ โดยชีวมวลนั้นสามารถเปลี่ยนไปเป็นเชื้อเพลิงได้จากกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางความร้อน โดยคุณสมบัติของพลังงานทดแทนคือเป็นพลังงานสะอาด และมีการปลดปล่อยแก๊สมลภาวะที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและสามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้ [1, 2]

ถึงแม้ว่าพลังงานชีวมวลนั้นจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ แต่พลังงานชีวมวลนั้นก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ เช่น ชีวมวลมีความชื้นสูง ยากต่อการขนส่ง ยากต่อการจัดเก็บ ค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวล กระบวนการปรับปรุงชีวมวลที่เรียกว่า กระบวนการทอริแฟคชัน จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

กระบวนการทอริแฟคชัน (torrefaction process) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อนที่อุณหภูมิในช่วง 200 – 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยในระหว่างกระบวนการทอริแฟคชันนั้นจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮดรอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ซึ่งส่งผลต่ออัตราส่วนของออกซิเจน คาร์บอน และไฮโดรเจนภายในเชื้อเพลิง โดยชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอริแฟคชันนั้นพบว่า ชีวมวลมีความชื้นที่น้อยลง มีความหนาแน่นทางพลังงานสูงขึ้น มีค่าความร้อนสูงขึ้น สามารถจัดเก็บได้นานขึ้นเนื่องจากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันนั้นจะมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ [3, 4]

เตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) เป็นเตาเผาที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว เอียงเล็กน้อย มีชุดขับเคลื่อนสำหรับทำให้เตาเผาหมุนตลอดเวลา ซึ่งเตาเผาแบบหมุนนั้นจะมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการเผาขยะ หรือ การเผาปูนซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งข้อดีของเตาเผาแบบหมุนคือด้วยการที่เตาเผาหมุนตลอดเวลาทำให้วัสดุที่อยู่ภายในนั้นได้รับ

ความร้อนอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ทำให้วัสดุที่ออกจากเตาเผาหมานั้นมีคุณลักษณะที่คล้ายกัน ในปัจจุบันนั้นได้มีการนำเตาเผาแบบหมุนมาใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณลักษณะคล้ายกันและมีกำลังการผลิตที่สูง แต่เนื่องด้วยกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นเป็นกระบวนการที่ต้องไม่มีออกซิเจนในการเผาเพื่อป้องกันการเกิดการเผาไหม้ดังนั้นเตาเผาแบบหมุนจึงต้องปิดสนิท ทำให้ไม่สามารถรู้ได้ว่าชีวมวลที่อยู่ภายในเตาเผาแบบหมุนนั้นจะเคลื่อนที่ออกจากเตาเผาแบบหมุนในช่วงเวลาไหน [5, 6]

ระยะเวลาดำเนินการนั้นมีส่วนสำคัญในกระบวนการทอรีแฟคชั่น เนื่องจากระยะเวลาที่ชีวมวลต้องผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น จะส่งผลต่อค่าความร้อน ความชื้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และคุณสมบัติอื่น ๆ ของชีวมวล การที่เราทราบเวลาของระยะเวลาการดำเนินงานนั้น จะทำให้เราได้คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นตามต้องการ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น และผลของความเร็วยรอบการหมุนของเตาเผา มุมโน้มเอียงของเตาเผา อัตราการป้อนเชิงปริมาตรและจำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน ที่ส่งผลต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนหรือระยะเวลาที่ชีวมวลอยู่ในเตาเผาแบบหมุน และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อคุณสมบัติของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบของเตาเผาแบบหมุนที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของมุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุนที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของจำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุนที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.2.5 เพื่อสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุน มีการเปลี่ยนแปลง

1.3.2 ความเร็วรอบ มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน และ จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุนมีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 อุณหภูมิสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันคือ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส

1.4.2 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ค่า คือ 0.15 0.2 และ 0.3 เมตร

1.4.3 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ในงานวิจัยมีความยาว 3 ค่า คือ 2.67 3 และ 6 เมตร

1.4.4 เชื้อมวลที่นำมาใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 4 ชนิด คือ กะลาปาล์ม กระจิน ชังข้าวโพด แกลบ

1.4.5 ใช้ความเร็วรอบในการหมุนเตาเผาแบบหมุน 3 ค่า คือ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที

1.4.6 ใช้มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน 3 ค่า คือ 1 3 และ 5 องศา

1.4.7 ใช้จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน 3 ค่า คือ ไม่มีใบกวน 1 และ 2 ใบ

1.4.8 ใช้อัตราการป้อนเชิงปริมาตรของวัสดุ 3 ค่า คือ 0.00078951 0.00311 และ 0.00523 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

1.4.9 ใบกวนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นใบกวนรูปตัว L

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมการทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.5.2 ทำการทดลองกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเตาเผาแบบหมุนและเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากกระบวนการทอรีแฟคชัน

1.5.3 ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนและบันทึกผลการทดลอง

1.5.4 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผล

1.5.5 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย

1.6.1 การทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน ทำการทดลองที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

1.6.2 การทดลองหาปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาดำเนินงานของเตาเผาแบบหมุน คือ ความเร็วรอบ มุมโน้มเอียง อัตราการป้อนเชิงปริมาตร และ จำนวนใบกวน จะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขอบเขตการทดลองเท่านั้น

1.7 คำจำกัดของงานวิจัย

ทำการศึกษาผลของกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อคุณสมบัติของชีวมวล และทำการศึกษาผลของความเร็วยรอบ มุมโน้มเอียง อัตราส่วนสนทัด อัตราการป้อนเชิงปริมาตร และจำนวนใบกวน ภายในเตาเผาที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 ชีวมวล (biomass) คือ สิ่งได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ต้นไม้ วัชพืชต่างๆหรือแม้กระทั่งขยะและมูลสัตว์ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานได้

1.8.2 เตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว เอียงเล็กน้อย มีชุดขับเคลื่อนเพื่อขับให้ตัวเตาหมุนตลอดเวลา มีลักษณะการใช้งานที่อุณหภูมิภายในห้องเผาใหม่มีอุณหภูมิสูง สามารถควบคุมระยะเวลาการเผาไหม้และวัตถุดิบที่จะเผาได้

1.8.3 กระบวนการทอรีแฟคชัน (torrefaction process) เป็นกระบวนการปรับสภาพของชีวมวล โดยเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อนในช่วงอุณหภูมิ 200 – 300 องศาเซลเซียส ในสภาวะไม่มีออกซิเจน

1.8.4 ระยะเวลาดำเนินการ (residence time) คือระยะเวลาที่วัสดุอยู่ภายในเตาเผาโดยจะนับตั้งแต่เริ่มต้นเข้าเตาเผาและสิ้นสุดเมื่อวัสดุออกจากเตาเผา

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือสิ่งที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตเช่น ต้นไม้ ชานอ้อย มันสำปะหลัง ถ่านฟืน แกลบ วัชพืชต่างๆ หรือแม้กระทั่งขยะและมูลสัตว์เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก [1] ทั้งนี้อาจจะสามารถจำแนกแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 2 แหล่งดังนี้ ของเสียจากการประกอบการทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม อาทิเช่น ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น รวมไปถึงของเสียประเภทพลาสติกและกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และของเสียจากแหล่งชุมชน อาทิเช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ของเสียจากสัตว์ เช่น มูลสัตว์ เป็นต้น

2.1.1 ชนิดของชีวมวล

2.1.1.1 ชังข้าวโพด

ชังข้าวโพด คือส่วนหนึ่งของข้าวโพดที่เหลือจากการสีเมล็ดข้าวโพดออกไป เมื่อก่อนเกษตรกรจะไม่ได้ใช้ประโยชน์จากชังข้าวโพด บางรายทิ้งให้ย่อยสลายไปเอง หรือในบางรายก็นำมาเผาทิ้งเพื่อเตรียมพื้นที่ปลูกในฤดูกาลถัดไป จนกระทั่งมีการศึกษาและนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรม ทำให้ชังข้าวโพดในปัจจุบันเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในชังข้าวโพดให้ค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ $\pm 3,000$ kcal/kg ชังข้าวโพด มีความชื้นมากกว่า 20-30 เปอร์เซ็นต์ และได้มีการนำมาผลิตพลังงานไฮโดรเจนตลอดถึงก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากทั้งน้ำตาลกลูโคส และไซโลส ที่หลงเหลืออยู่ในเศษพืช เป็นต้นกำเนิด

2.1.1.2 กะลาปาล์ม

กะลาปาล์ม เป็นส่วนประกอบหนึ่งของผลปาล์มโดยจะอยู่ระหว่างเส้นใยปาล์มที่ยึดติดเปลือกด้านนอกสุดกับเนื้อปาล์มที่อยู่ด้านในสุด ลักษณะทั่วไปที่มีสีน้ำตาล เนื้อแข็ง ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม เมื่อเกิดกระบวนการสกัดเอาน้ำมันปาล์มออกแล้วจะเหลือกะลาปาล์ม ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ให้ค่าความร้อนสูง ในปัจจุบันเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่โรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้เป็น

เชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาที่มีราคาสูง จนทำให้ในประเทศไทยมีกะลาปาล์มไม่เพียงพอกับความ ต้องการ ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น อินโดนีเซีย มาเลเซีย เป็นต้น

2.1.1.3 กระจิน

กระจิน เป็นพืชตระกูลถั่วชนิดไม้ยืนต้น และเป็นพืชพื้นเมืองในประเทศเม็กซิโก และ กัวเตมาลา แต่ได้มีการนำเข้ามายังประเทศฟิลิปปินส์ และประเทศอื่นๆ ในเขตเอเชียตะวันออกเฉียง ใต้ รวมทั้งในประเทศไทย ในราวคริสต์ศตวรรษที่ 16 และประเทศในเขตแปซิฟิก รวมทั้งประเทศ ออสเตรเลีย ในราวคริสต์ศตวรรษที่ 19 ปัจจุบันต้นกระจินมีการกระจายตัวในเขตร้อนชื้นต่าง ๆ ทั่ว โลก กระจินมีการเจริญเติบโตของต้นอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ทำชีวมวล

2.1.1.4 แกลบ

แกลบ ถือเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือกซึ่งทำให้เกิดเศษของเปลือกข้าว ออกมา มีลักษณะสีเหลืองทอง สีเหลืองอ่อน สีน้ำตาลแดงขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ข้าว แกลบประกอบด้วย สารอินทรีย์ และซิลิกา ปริมาณสารอินทรีย์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนประมาณร้อยละ 51 ออกซิเจนร้อยละ 42 ส่วนที่เหลือจะเป็นไฮโดรเจน และไนโตรเจน ส่วนซิลิกาจะพบมากบริเวณผิว นอกของแกลบจึงทำให้แกลบมีความแข็งสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุขัดผิวได้

2.1.2 ข้อดีและข้อเสียของเชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิต ชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้นซึ่งต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็น เวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการ จำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

2.1.2.1 ข้อดีของชีวมวล

- การนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้า จะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ ใช้ไป จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูก ผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการ เจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้ น้ำมันในภาคขนส่ง หรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า
- ลดการใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ฟอสซิล ปีโตรเลียม เป็นต้น อีกทั้งเชื้อเพลิงจากชีวมวลหาได้ง่ายและถูกกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

- เป็นการลดขยะรวมถึงเพิ่มคุณค่าของที่เหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรม เพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรที่ขายวัสดุให้กับโรงงาน เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุด
- ในชุมชนสามารถตั้งโรงไฟฟ้าขนาดเล็กได้เพื่อใช้เองและขายให้การไฟฟ้าหรือภาคอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับชุมชน [7]

2.1.2.2 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 [7]

2.1.3 การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล

การปรับปรุงคุณภาพชีวมวล จะช่วยในการลดปริมาณความชื้นซึ่งส่งผลให้เพิ่มค่าความร้อนและมีความสะดวกในการเก็บรักษา และปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลให้สะดวกต่อการใช้ การปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

1. กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง การคัดแยกเฉพาะส่วน และการบีบน้ำมัน
2. กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical conversion) ที่ใช้เชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยโดยปราศจากอากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวมวลและกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล

3. กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) โดยกระบวนการนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆได้อีกคือ การเผาไหม้ ไพโรไลซิส และ ก๊าซซิฟิเคชัน [8]

ทั้งนี้ลักษณะและความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาพที่ใช้และวัตถุประสงค์ หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ ถึงแม้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีจะเป็นกระบวนการที่ใช้สภาวะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ค่อนข้างที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน เนื่องจากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลค่อนข้างมาก จึงทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจมากกว่า ทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่หลากหลายกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี

2.2 กระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction)

กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) อย่างอ่อนที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยเพื่อไม่ให้ชีวมวลเกิดการเผาไหม้ในระหว่างกระบวนการ กระบวนการทอรีแฟคชันนี้เป็นการปรับปรุงชีวมวล และยังช่วยลดข้อด้อยของชีวมวลได้จริง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อนต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น การดูดความชื้นกลับลดลง และมีความกรอบทำให้ง่ายต่อการนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ ส่งผลให้สะดวกในการขนส่งและการเก็บรักษา ความชื้นลดลงและมีปริมาณพลังงานสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบ [3] ลดอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษาชีวมวลในปริมาณที่มากขึ้นด้วย

Jaya et al. (2011) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟคชันชีวมวลเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลในเชิงของคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีที่น่าสนใจ กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นการให้ความร้อนกับชีวมวลอย่างช้าๆ ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อยในช่วงอุณหภูมิที่สูงที่สุด 300 องศาเซลเซียส กระบวนการทอรีแฟคชันสามารถที่จะกำหนดเป็นกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลมาจากการควบคุมในบางส่วนและการไพโรไลซิสชีวมวล จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 - 280 องศาเซลเซียส ดังนั้นกระบวนการนี้สามารถเรียกได้ว่าเป็นไพโรไลซิสอย่างเบาที่จะเกิดขึ้นในช่วงของอุณหภูมิที่ต่ำกว่า กระบวนการทอรีแฟคชันจะดำเนินการผลิตของแข็งที่มีปริมาณความชื้นต่ำและค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวลดิบ ส่วนที่สำคัญที่สุดขององค์ประกอบของควินและสาร

ระเหยจะถูกนำออกไปในระหว่างการทอรีแฟคชั่น ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้มวลที่ต่ำกว่าแต่มีค่าความร้อนที่สูงกว่า โดยทั่วไปจะเกิดการสลายตัวและการคาร์บอนไนเซชันของเฮมิเซลลูโลส การลดการสลายตัวและการเกิดสารระเหยของลิกนินและเซลลูโลส คุณสมบัติของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น ได้แก่ ความสามารถในการบด ความสามารถในการขึ้นรูป ค่าความไม่ชอบน้ำ ดังนั้นจะมีการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงาน จะมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของ Ultimate และ proximate จากการเพิ่มของปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนและการลดลงของปริมาณความชื้นและออกซิเจน[4]

Chen et al. (2011) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการทอรีแฟคชั่นเปลือกไม้ (Luan) และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวล ที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นคือ 220, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการทอรีแฟคชั่นอย่างเบา อ่อนและรุนแรง ตามช่วงเวลาของการทอรีแฟคชั่นที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง หลังจากการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 280 องศาเซลเซียส จะเพิ่มค่าความร้อนของไม้ได้ถึง 40% ในขณะที่น้ำหนักของไม้จะสูญเสียไป 50% การเพิ่มค่าความสามารถในการบดและค่าความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงมวลที่สูญเสียของไม้ จะทำได้ดีในช่วงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ไม้ที่ได้ทำปฏิกิริยากว่า 50% จะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่ถูกลบออกนั่นคือ monoaromatics ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยๆ ของ heterocyclic hydrocarbons ที่ได้รับจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น [9]

Phanphanich et al. (2011) ได้ทำการศึกษาลักษณะของเชื้อเพลิงและความสามารถในการบดของแผ่นไม้สนและไม้ซุงที่ได้รับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 225 - 300 องศาเซลเซียส ในเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพการบดของชีวมวลทอรีไฟร์จะประเมินจากพลังงานที่ต้องการในการบด การกระจายของขนาดอนุภาคและขนาดของอนุภาคเฉลี่ย เพื่อที่จะเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบและถ่านหิน จากการศึกษาพบว่า พลังงานจำเพาะที่ต้องการในการบดของชีวมวลทอรีไฟร์นี้จะลดลงไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ พลังงานการบดของชีวมวลทอรีไฟร์จะลดลงเป็น 24 kW/h ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของแผ่นไม้สนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ด้วยกระบวนการทอรีแฟคชั่นของชีวมวลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเป็นการปรับปรุงเชื้อเพลิงและปรับปรุงคุณสมบัติในการบดที่ใกล้เคียงกับถ่านหิน [10]

Bridgeman et al. (2008) ได้ทำการศึกษาทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชั่น ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ด้วยชีวมวลทั้งสามชนิด คือ ดอกหญ้า ฟางข้าว และวิลโลว์ การประเมินผลิตภัณฑ์และมวลพลังงานที่สูญเสียในระหว่างกระบวนการได้ทำการศึกษาในขนาดห้องปฏิบัติการ การทดลองที่สภาวะกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่แตกต่างกันจะดำเนินการตรวจสอบความเหมาะสมของกระบวนการของชีวมวลทั้งสามชนิดนี้ กระบวนการทอรีแฟคชั่นจะดำเนินการวิเคราะห์ทางเคมีและลักษณะของชีวมวลเริ่มต้นจะคล้ายกับถ่านหิน นอกจากนี้จะชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบของสาร

ระเหยจะลดลง และการผลิตพลังงานทางเลือกลงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เสถียรกว่า แต่ในระหว่างการเผาไหม้ ความร้อนของปฏิกิริยาจะดีกว่า ความแตกต่างระหว่างผลได้ของพลังงานและมวลจะปรับปรุงอุณหภูมิ ทอรีแฟลชชั่นที่สูงกว่า พฤติกรรมการเผาไหม้ของชีวมวลดิบและชีวมวลทอรีไฟร์จะได้รับการศึกษาด้วย differential thermal analysis (DTA) จากอนุภาคแขวนลอยเดี่ยวใน methane-air flame และการดำเนินการเผาไหม้จะเก็บผลด้วยกล้องความเร็วสูง แสดงให้เห็นว่าสารระเหยและทาร์ที่ได้จากการ ทอรีไฟร์ชีวมวลจะคายพลังงานเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับชีวมวลดิบและจะขึ้นอยู่กับสถานะของ กระบวนการทอรีแฟลชชั่น เชื้อเพลิงทอรีไฟร์จะมีพลังงานที่สูงถึง 96% ต้นวิลโลว์ทอรีไฟร์จะจุดติดไฟ ได้อย่างรวดเร็ว อาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณความชื้นมีค่าต่ำทำให้จุดติดไฟได้อย่างรวดเร็ว อนุภาคทอรี ไฟร์จะเริ่มต้นด้วยการเผาไหม้ซาร์ที่เร็วกว่าการเผาไหม้วิลโลว์ [11]

Tian et al. (2019) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟลชชั่นที่มีผลต่อซังข้าวโพด โดยได้ ศึกษาคุณลักษณะ, พฤติกรรมทางความร้อน และ จลศาสตร์ของซังข้าวโพด โดยจากการวิเคราะห์ แบบประมาณและแบบแยกธาตุพบว่า กระบวนการทอรีแฟลชชั่นส่งผลให้สัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น และ ออกซิเจนมีค่าน้อยลง และยังพบว่าผลได้เชิงมวลของชีวมวลจาก กระบวนการทอรีแฟลชชั่นมีค่าน้อยลงแต่ผลได้เชิงพลังงานนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น [12]

Chen et al. (2018) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟลชชั่นแกลบโดยได้ศึกษาถึง คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟลชชั่นแกลบ รวม ไปถึงค่าผลได้เชิงพลังงาน โดยในการศึกษานี้ได้ใช้อุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟลชชั่นในช่วง 210 – 300 องศาเซลเซียส โดยผลจากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ของแข็งนั้นมีค่าปริมาณของออกซิเจนที่ ลดลง ผลิตภัณฑ์ของแก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟลชชั่นมากที่สุดคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดย อยู่ที่ประมาณ 52.9-73.8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร รองลงมาคือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ อยู่ที่ ประมาณ 26.3-39.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้หลักๆจะเป็นน้ำและน้ำมันทาร์ และอาจมีกรดบางชนิดเป็นปริมาณเล็กน้อย อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟลชชั่นส่งผลต่อการ สลายตัวของออกซิเจน โดยในช่วงอุณหภูมิ 210-300 องศาเซลเซียส ออกซิเจนภายในชีวมวล ประมาณ 9.5-63.2 เปอร์เซ็นต์ ได้เกิดการสลายตัวเป็นแก๊ส และ ของเหลว ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การ เกิดน้ำ, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั้นเป็นสาเหตุหลักๆของการลด ออกซิเจนจากกระบวนการทอรีแฟลชชั่น [13]

Li et al. (2018) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟลชชั่นเพื่อผลิตถ่านภายใต้สภาวะ ไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้ทำการทอรีแฟลชชั่นที่อุณหภูมิ 220-300 องศาเซลเซียส โดย จากการทอรีแฟลชชั่นในไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งอยู่ที่ 69.39- 95.03 และ 67.20-94.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และได้ค่าความร้อน 16.58-24.88 และ 16.68- 24.10 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปริมาณของคาร์บอนเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของไฮโดรเจนและ

ออกซิเจนนั้นลดลง จากการทดสอบการเผาไหม้พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสในสภาวะคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเหมาะสมที่สุดในการทอรีแฟคชั่นซังข้าวโพด [14]

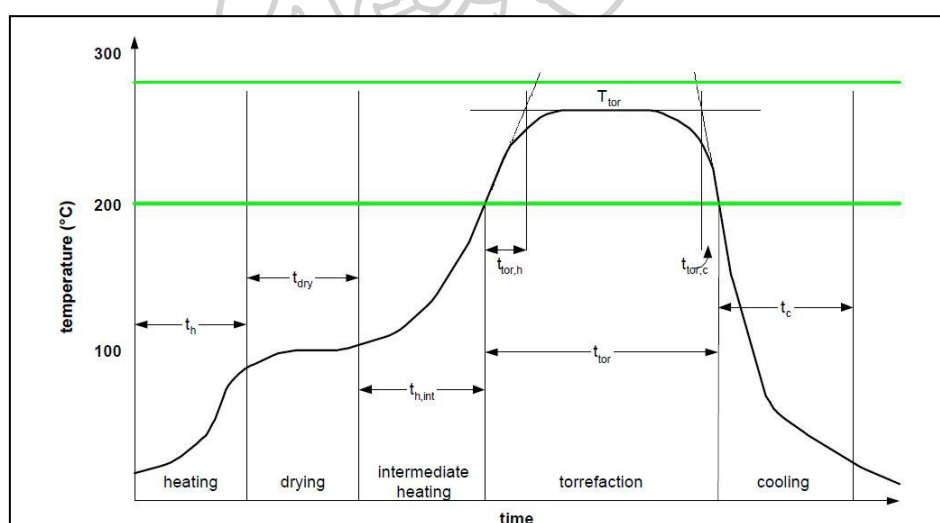
Soponpongpipat et al. (2016) ได้ศึกษาการทำนายค่าความร้อนของชีวมวลจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นบนพื้นฐานของการสลายตัวทางพลศาสตร์ของชีวมวล โดยค่าที่ได้จากการทำนายนั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของการทอรีแฟคชั่นแห้งน้ำมันสำปะหลัง ซึ่งผลการในงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการดำเนินการที่มีผลต่อค่าความร้อนของชีวมวลทอรีไฟร์ ซึ่งผลที่ได้มานั้นได้แสดงถึงค่าความร้อนของการทำนายเปรียบเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากเครื่องบอมแคลอริมิเตอร์ ซึ่งพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของสมการอยู่ที่ 7.03 เปอร์เซ็นต์ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาการดำเนินการเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อถึงระยะเวลาการดำเนินการค่าหนึ่งแวนโน้มของค่าความร้อนจะเข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งความเข้าใจนี้ได้นำไปสู่การวางแผนการผลิตด้วยการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น [15]

Tharawadee et al. (2015) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นต่อคุณสมบัติทางกายภาพและต้นทุนในกระบวนการผลิตของการทอรีแฟคชั่นชีวมวลผง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แห้งน้ำมันสำปะหลังเป็นชีวมวลสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยได้ทำการทดลองเป็น 2 กรณี คือ นำชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นจากนั้นถึงนำมาสับ ส่วนกรณีที่ 2 คือนำแห้งน้ำมันสำปะหลังมาสับก่อนแล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่น ในการทดลองนี้ได้ใช้อุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส ระยะเวลาดำเนินการคือ 90 นาที จากงานวิจัยพบว่าค่าความร้อนของแห้งน้ำมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นอยู่ที่ 21.9 ± 0.07 MJ/kg ถึง 22.55 ± 1.39 MJ/kg ค่าความชื้นอยู่ที่ 1.41 ± 0.73 ถึง 1.05 ± 0.27 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าต้นทุนรวมของกระบวนการในกรณีที่ 1 นั้นจะสูงกว่าในกรณีที่ 2 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการควรเริ่มต้นจาก นำชีวมวลมาสับหยาบ นำมาผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น และนำมาสับละเอียด ซึ่งทำให้ ต้นทุนรวม ขนาดของอนุภาคและ ต้นทุนต่อพลังงานนั้นมีค่าลดลงเมื่อทำตามกรณีที่ 1 [16]

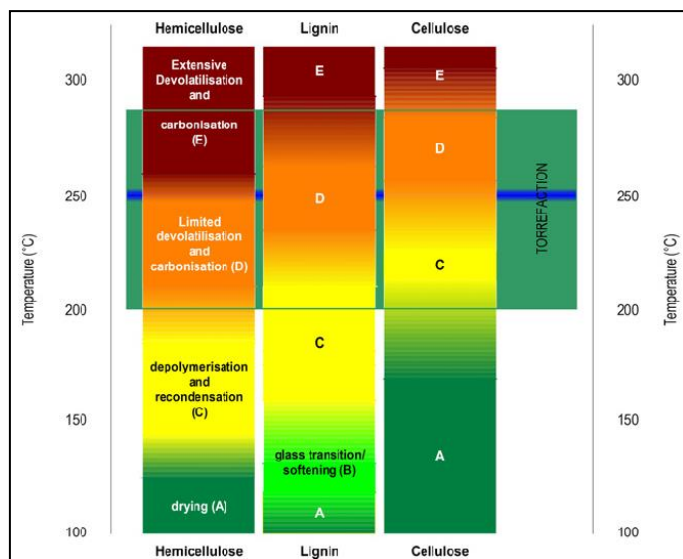
2.2.1 หลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ 1.ช่วงการทำความร้อน 2.การอบแห้ง 3.การทำความร้อนขึ้นกลาง 4.การทอรีแฟคชั่นและการทำเย็น โดยชีวมวลดิบถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในขั้นตอนการทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิชีวมวลดิบก่อนเข้าสู่

ขั้นตอนการอบแห้ง ในกระบวนการทำความร้อนอัตราการทำความร้อนควรจะต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่ออนาที เมื่อชีวมวลดิบเข้าถึงอุณหภูมิที่ต้องการโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 90 - 150 องศาเซลเซียส เป็นการเริ่มต้นการอบแห้งชีวมวลดิบ น้ำอิสระภายในชีวมวลจะระเหยและปริมาณความชื้นของชีวมวลดิบจะลดลง มันเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเอาน้ำออกจากชีวมวลดิบ ซึ่งหากไม่มีการดำเนินการดังกล่าวจะเป็นอุปสรรคของการย่อยสลายทางความร้อนชีวมวลดิบในขั้นตอนทอริแฟคชัน เมื่อขั้นตอนแรกสิ้นสุดลง ชีวมวลถูกให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิทอริแฟคชันที่เรียกว่าขั้นตอนการทำความร้อนขึ้นกลาง ในกระบวนการทอริแฟคชัน อุณหภูมิของชีวมวลถูกรักษาให้คงที่ในช่วง 200 - 300 องศาเซลเซียส ในระหว่างช่วงเวลาการย่อยสลายทางความร้อน เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวในช่วงแรกอุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส ต่อมาลิกนินและบางส่วนของเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 270 - 300 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อนจะแสดงดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ขั้นตอนการทอริแฟคชันจะสำเร็จเมื่อการทอริไฟร์ชีวมวลถูกเพิ่มในอุณหภูมิสูงและการทำเย็นนั้นจะต้องไรร้ออกซิเจนหรือทั้งสองกระบวนการอยู่ในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย [3]



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกระบวนการทอริแฟคชัน



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของชีวมวลติบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อน

2.3 ผลของชีวมวลที่ผ่านการกระบวนการทอริแฟคชัน

2.3.1 ค่าความร้อน (Heating Value)

ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงนั้นถูกเผาไหม้ โดยทั่วไปค่าความร้อนมี 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูง (High Heating Value) และค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value) ซึ่งค่าความร้อนสูงเป็นค่าที่วัดได้โดย รวมความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกลั่นตัวของไอน้ำเข้าด้วยวิธีการหาค่าความร้อนด้วยการเผาไหม้โดยตรงสามารถทำได้ด้วยการใช้ บอมบ์แคลอริมิเตอร์ ดังแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงระหว่างสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ด้วยมาตรฐาน ASTM –E 711 [17], NBR 8633/84 standard [18]



รูปที่ 2.3 บอมบ์แคลอริมิเตอร์

การคำนวณค่าความร้อน

การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่แท้จริง ได้ดังสมการ

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

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

อุณหภูมิกลายเป็นคงที่ (นาที)

- t คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ถูกต้อง (องศาเซลเซียส)
 t_c คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่อ่านได้ (องศาเซลเซียส)
 t_a คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ที่เวลาจุดระเบิด (องศาเซลเซียส)
 r_1 คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง 5 นาทีก่อนจุดระเบิด (องศาเซลเซียสต่อ
 นาที)
 r_2 คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง 5 นาทีหลังจากเวลาที่เริ่มต้นของคาบ c
 (องศาเซลเซียสต่อนาที)

ค่าความร้อนของการเผาไหม้

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

- เมื่อ H_g คือ ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้ (จุลต่อกรัม)
 W คือ ค่าความจุความร้อนของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
 m คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)
 e_1 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ HNO_3 (23.9 แคลอรี)
 e_2 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ H_2SO_4 (13.7 แคลอรี)
 e_3 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้

Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)

ค่ามาตรฐานแคลอรีมิเตอร์

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

เมื่อ	W	คือ ค่าความจุความร้อนของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)
	H	คือ ค่าความร้อนของกรดเบนโซอิก (ให้พลังงาน 6318 แคลอรีต่อกรัม)
	m	คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)
	t	คือ ผลรวมของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)
	e ₁	คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ HNO ₃ (23.9 แคลอรี)
	e ₃	คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)

2.3.2 ค่าความชื้น (Moisture content)

ปริมาณความชื้น (moisture content) แสดงออกมาเป็นสัดส่วนน้ำหนักของความชื้นต่อน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงแห้งหรือน้ำหนักมวลเชื้อเพลิงรวมทั้งหมด สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิง (กรัม)

W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของเชื้อเพลิง (กรัม)

M คือ ค่าความชื้น (เปอร์เซ็นต์)

ปริมาณความชื้นของชีวมวลจะขึ้นอยู่กับพันธุ์ไม้ (เช่น ไม้สน ยางพารา กระจิน ต้นสัก) ชนิด ส่วนประกอบ (เช่น แกนไม้ เปลือกไม้) และกระบวนการเตรียม (เช่น ชีวมวลที่ได้จากการตัดแต่ง การ สกัดเปลือก ชีวมวลจากโรงเลื่อย โรงผลิตเยื่อกระดาษ) ซึ่งมีความหลากหลายมากในช่วง 10-60% จากเนื้อไม้ที่มีความพรุนและธรรมชาติของการรับและสูญเสียความชื้นได้นี้นำไปสู่แนวคิดเกี่ยวกับจุด อิ่มตัวของเส้นใย (fiber saturation point, FSP) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นระดับปริมาณความชื้นที่ช่องรูพรุน หรือพื้นผิวภายในเส้นใยของไม้ถูกปกคลุมด้วยชั้นน้ำซึ่งอยู่บนผิวได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน จุดอิ่มตัวของ เส้นใยจึงเป็นจุดที่บ่งบอกถึงการหดตัวหรือการบวมของเนื้อไม้หากมีการดึงน้ำออกหรือเติมน้ำเข้าไปใน เนื้อไม้ โดยทั่วไปจุดอิ่มตัวเส้นใยของไม้จะอยู่ที่ประมาณ 23-27% ของมวลรวมทั้งหมด โดยในการวัด ค่าความชื้นนั้นจะทำได้โดยการนำเชื้อเพลิงเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความชื้นของเชื้อเพลิง โดยรูปตู้อบลมร้อนจะแสดงอยู่ในรูปที่



รูปที่ 2.4 ตู้อบลมร้อน

2.3.3 ความหนาแน่นบักก์ (Bulk density)

ค่าความหนาแน่นบักก์ คือน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM E-873 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

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

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



รูปที่ 2.5 เครื่องทดสอบค่าความหนาแน่นบัก

2.3.4 ค่าความทนทาน (Durability)

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

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

เมื่อ	PDI	คือ ค่าความทนทานแห่งเชื้อเพลิง (%)
	WPW	คือ น้ำหนักแห้งชีวมวลที่สมบูรณ์ไม่แตกหัก (kg)
	IW	คือ น้ำหนักแห้งชีวมวลเริ่มต้น (kg)



รูปที่ 2.6 เครื่องวัดความทนทาน

2.3.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle distribution)

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคคือกระบวนการที่ใช้ในการประเมินการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุที่เป็นเม็ด การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตวัสดุ การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ และนำค่าของที่เหลือตกอยู่บนตะแกรงมาวิเคราะห์ โดยรูปของเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค

2.3.6 ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

เป็นการศึกษาปริมาณความชื้นที่ชีวมวลดูดเข้าไป ซึ่งจะทำให้ชีวมวลเน่าสลายและผุพังได้ง่ายเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลาสั้น ๆ เมื่อนำชีวมวลมาผ่านการทอริไฟร์จะทำให้ชีวมวลมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ เนื่องจากระหว่างกระบวนการทอริไฟร์ความร้อนจะทำลาย OH-groups ที่อยู่ภายในชีวมวล ทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่อึดตัว และไม่มีขี้ ทำให้ลิกนินกลายเป็นสารพลาสติกธรรมชาติที่เคลือบอยู่ในชีวมวลส่งผลให้ชีวมวลทอริไฟร์ มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ [19]

2.3.7 การวิเคราะห์ประมาณและแบบแยกธาตุ (Proximate and ultimate analysis)

ในการแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกได้เป็นแบบพื้นฐานเปียก (wet basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (as-received basis) และแบบพื้นฐานแห้ง (dry basis) จากการอบวัสดุเชื้อเพลิงให้ความร้อนในภาชนะปิดภายใต้บรรยากาศ

ของก๊าซควบคุมเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด ปริมาณเถ้าในชีวมวลเศษวัสดุการเกษตรมีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวลประเภทไม้ ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆในเชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน

2.4 เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของเตาเผาแบบหมุน

เตาเผาแบบหมุน มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว เอียงเล็กน้อย มีตัวมอเตอร์เพื่อขับให้ตัวเตาหมุนตลอดเวลา มีลักษณะการใช้งานที่อุณหภูมิสูงภายในห้องเผาไหม้จึงประกอบไปด้วยวัสดุทนไฟ สามารถควบคุมระยะเวลาการเผาไหม้และปริมาณของวัตถุดิบที่จะเผาได้ จึงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ [5]

2.4.2 ชนิดของเตาเผาแบบหมุน

2.4.2.1 เตาเผาแบบเปียก (Wet Kilns)

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

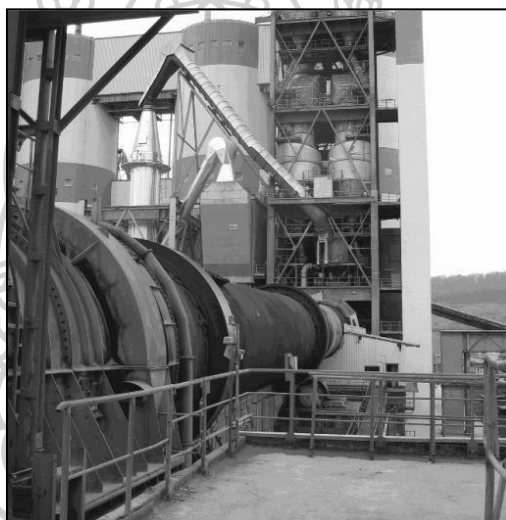


รูปที่ 2.9 เตาเผาแบบแห้งชนิดยาว (Long Dry Kilns)

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.3 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kiln)

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



รูปที่ 2.10 เตาเผาแบบแห้งชนิดสั้น (Short Dry Kilns)

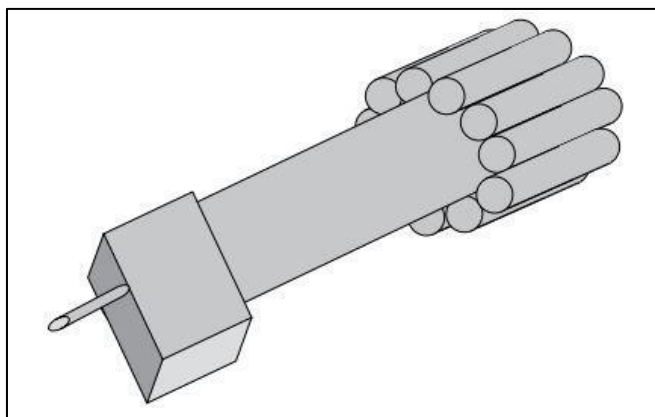
ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.4 เตาเผาแบบคูลเลอร์และเครื่องเป่า (Cooler and Dryer Kilns)

Cooler และ Dryer บางชนิดสามารถอยู่ในรูปแบบตัวสัมผัสที่ติดกับเตาเผาแบบหมุนได้โดย แม้ว่าบางอันจะมีคอนแทคบรรจุดัดเช่นตะแกรงคูลเลอร์ คูลเลอร์แบบหมุนสามารถเป็นได้ทั้งในสายการผลิตหรือที่แนบมา จำนวนซึ่งจะถูกกำหนดโดยสูตรง่าย ๆ

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

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



รูปที่ 2.11 เตาเผาแบบ Cooler and Dryer

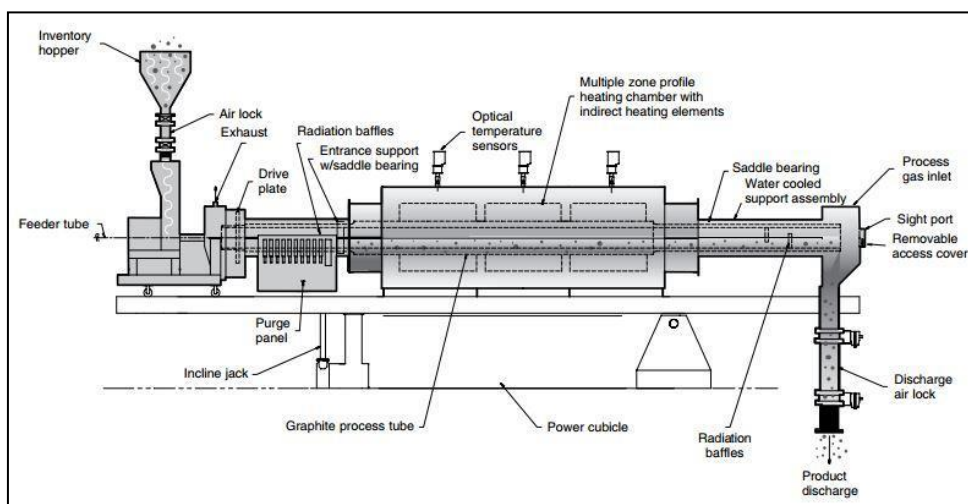
ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.2.5 เตาเผาแบบให้ความร้อนภายนอก (Indirect fired Kiln)

เตาเผาชนิดนี้นิยมให้ความร้อนจากภายนอก มักจะได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่ติดต่อกันโดยตรงระหว่างวัสดุและก๊าซให้แหล่งความร้อนที่ไม่พึ่งประสงค์ ในกรณีนี้แหล่งความร้อนภายนอกเพื่อเป็นเตาเผา แก๊สไหลผ่านภายใน ที่อยู่ใน freeboard ที่ใช้สำหรับล้างการระเหยหรือก๊าซที่เกิดขึ้นจากแนวของวัสดุเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือกายภาพ เนื่องจากประสิทธิภาพของความร้อนต่ำ เตาเผาอุณหภูมิภายนอกมีขนาดเล็ก โดยทั่วไปค่าจะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 m (50 นิ้ว) และใช้สำหรับการใช้งานเฉพาะเช่น การเผาวัสดุพิเศษ

คุณลักษณะเฉพาะของเตาเผาชนิดนี้ คือ ความหลากหลายและถูกจัดแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ควบคุมได้เป็นช่วงๆ ซึ่งสามารถให้ความร้อนโดยไฟฟ้า หรือ แก๊สร้อน ดังนั้นเตาเผาชนิดนี้สามารถให้ในอุณหภูมิสูง ในบางกรณี เช่น เตาเผากราฟไฟท์ที่สามารถให้อุณหภูมิถึง 2,400 องศาเซลเซียส เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดช่วงของเวลา และ ควบคุมอากาศ รวมไปถึงการควบคุมสารไวไฟ ลักษณะการใช้งานโดยทั่วไปของเตาเผาชนิดนี้ได้แก่ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (calcination), ปฏิกิริยา Reduction, ปฏิกิริยาการควบคุม oxidation, ปฏิกิริยา carburization, ปฏิกิริยา solid-state

reactions และ ปฏิกิริยา purification รวมไปถึงการฟื้นฟูของเสียในขนาดเล็กที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งเตาเผาแบบ Indirect fired จะแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เตาเผาแบบ Indirect fired

ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

2.4.3 ส่วนประกอบของเตาเผาแบบหมุน

2.4.3.1 ห้องเผาไหม้

องค์ประกอบโดยพื้นฐานของห้องเผาประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ

ส่วนเปลือกนอกเตาเผา เป็นส่วนนอกสุดของเตาเผา ทำมาจากเหล็กกล้าที่ทำขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะงาน แผ่นเหล็กกล้ารีดบางมีความหนา มักจะอยู่ในช่วง 18-25 มิลลิเมตร เป็นแผ่นรีดเย็นลักษณะโดยทั่วไปเป็นชิ้นครึ่งวงกลม เมื่อนำมาประกบกันแล้วจะทำให้เปลือกนอกมีความยาวเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนสั้นมักจะถูกประกอบที่โรงงานและการประกอบขั้นสุดท้ายที่ได้ดำเนินการในสถานที่ที่มีเตาเผาในสถานที่ ปัญหาที่พบคือ อุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาทำได้เพียง 1400 องศาเซลเซียส ขณะที่แก๊สมีอุณหภูมิถึง 1900 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวของเหล็กกล้าเพียง 1300 องศาเซลเซียส เหล็กกล้าจะเริ่มอ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส จึงมีส่วนที่เป็นอิฐทนไฟหรือชั้นซีเมนต์

ชั้นวัสดุทนไฟ ประกอบด้วยอิฐทนไฟหรือคอนกรีตหล่อ มีไว้การป้องกันเปลือกนอกเตาเผาจากอุณหภูมิที่สูงภายในเตาเผาและเพื่อปกป้องมันจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีฤทธิ์กัดกร่อน วัสดุทนไฟที่เลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในเตาเผาและลักษณะทางเคมีของวัสดุที่อยู่ภายในเตาเผา ความหนาของเยื่อโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 80-300 มิลลิเมตร วัสดุทนไฟโดยทั่วไปจะมีความสามารถในการรักษา

อุณหภูมิให้ลดลงจาก 1000 องศาเซลเซียสหรือมากกว่านั้น เพื่อให้อุณหภูมิของเปลือกนอกต่ำกว่า 350 องศาเซลเซียส เพื่อปกป้องเหล็กจากความเสียหาย

ลักษณะดังกล่าวของห้องเผายังส่งผลไปยังการออกแบบเตาเผาในส่วนของความยาว, เส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผา และมุมในการหมุนของเตาเผา รูปร่างโดยทั่วไปของเตาเผาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 3 –6 เมตร และความยาวของเตาเผาอยู่ตั้งแต่ 10 จนถึง 230 เมตร ตามความต้องการของผู้สั่งทำ แต่ส่วนหนึ่งที่ส่งผลต่อการออกแบบเตาเผาเป็นอย่างมากคือ มุมที่ใช้ในการหมุนเตาเผา จากงานวิจัยของ Njeng et al. (2015) มุมที่เหมาะสมสำหรับการหมุนเตาเผาอยู่ที่ 2-3 องศา จะทำให้ลักษณะของวัสดุที่ออกมาจากเตาเผามีค่าที่ดีที่สุด มุมของเตาเผาอื่นนอกจากนี้ส่งผลให้ค่าที่ไม่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่เฉพาะทาง [20, 21]

2.4.3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อนเตาเผา

เตาเผามักจะถูกขับเคลื่อนโดยลูกกลิ้งขับเคลื่อน เกียร์จะเชื่อมต่อผ่านทางโซ่เกียร์ปรับความเร็วด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า การเริ่มต้นที่แรงบิดสูงเพื่อเริ่มเตาเผาที่มีการไหลขนาดใหญ่สำหรับ 6 x 60 เมตรต้องใช้กำลังประมาณ 800 กิโลวัตต์ที่จะเปิด 3 รอบต่อนาที ความเร็วของการไหลของวัสดุผ่านเตาเผาเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการหมุนและอื่นๆ หากแรงบิดของมอเตอร์ไม่เพียงพอต่อการทำงานของเตาเผา จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของช่วงบนและล่างของเตาเผาได้ ดังนั้นความเร็วจึงเป็นตัวแปรจำเป็นที่จะต้องควบคุม จากงานวิจัยของ Njeng et al. (2015) ความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนเตาเผาอยู่ที่ 3 รอบต่อนาที วัสดุที่อยู่ภายในเตาเผาจะมีการกระจายตัวที่ดีเมื่อเทียบกับความเร็วอื่นๆ วัสดุจะมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นอุณหภูมิ จึงทำให้ได้รับความร้อนจากเตาเผาไม่ทั่วถึง [20, 21]

2.4.3.3 แหล่งความร้อน

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

2.4.3.4 ไบกวน

ไบกวน เป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่ติดตั้งเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุน ทำจาก เหล็กกล้า ทนทานต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี รูปร่างและลักษณะของไบกวนนั้นไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความต้องการในการออกแบบและการนำไปใช้งานของผู้สั่งทำ จากงานวิจัยของ Njeng et al. (2015) รูปร่างของไบกวนในงานวิจัยมี 2 ลักษณะ คือ ไบกวนแบบตรง (Straight lifter) ความหนา 10 มิลลิเมตร ทำมาจาก Incoloy Aolly 800 และ อีกลักษณะคือ ไบกวนแบบตั้งฉาก (Rectangular lifter) ความหนา 10 มิลลิเมตร มุมในการงอ 90 องศา ได้ทำการทดลองในเตาเผาแบบหมุนขนาด ความยาว 1.95 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผา 0.101 เมตร ทดลองที่ความเร็วรอบ 3-5 รอบ ต่อนาที มุมของเตาเผา 1-5 องศา ให้ผลได้ว่า ไบกวนทั้งสองลักษณะส่งผลที่ไม่แตกต่างทางนัยสำคัญ [20, 21] และจากงานวิจัยของ Lee et al. (2013) ได้ทำการออกแบบไบกวนมา 4 ลักษณะ นำมา ทดลองเพียงแค่ 3 ลักษณะ ทำการทดลองโดยติดตั้งไบกวนแต่ละแบบลงในเตาเผาแบบหมุนขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 5.5 เมตร ความยาวเตาเผา 130 เมตร ที่ความเร็วรอบ 1-2 รอบต่อนาที ผลที่ได้จาก งานวิจัยนี้คือ การติดตั้ง lifter ช่วยให้ถ่ายเทความร้อนระหว่างวัสดุกับแก๊สร้อนนั้นดีขึ้น และทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้นั้นกระจายตัวตามแนวแกนได้ดีขึ้นอีกด้วย [22]

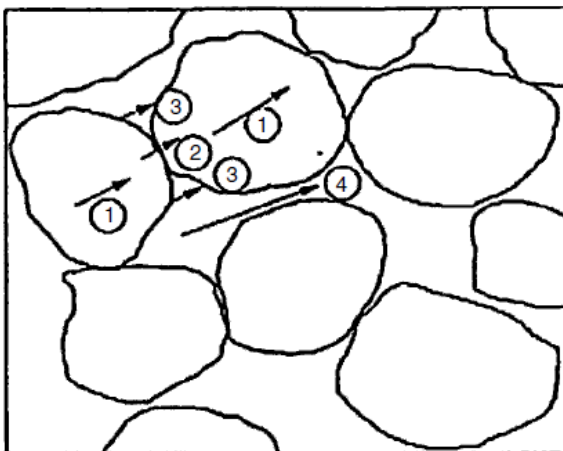
2.4.4 การใช้งานเตาเผาแบบหมุน

เตาเผาแบบหมุนพบในกระบวนการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับของแข็ง รวมไปถึงการอบแห้ง การเผาให้เป็นถ่าน ใช้ในการผสม การให้ความร้อน การทำให้เย็น การทำให้ขึ้น การเผา ปฏิกิริยาที่ได้ก๊าซ ธรรมชาติจากของแข็ง ซึ่งการประยุกต์ใช้เตาเผาแบบหมุนที่พบมากที่สุดและสำคัญที่สุดจะพบในการผลิตปูนซีเมนต์ ผู้ผลิตรายใหญ่ทั้งหมดเลือกใช้เตาเผาแบบหมุนเป็นอุปกรณ์ เตาเผาปูนซีเมนต์อาจมีขนาดใหญ่มาก

การประยุกต์ใช้เตาเผาแบบหมุนอีกแบบคือใช้สำหรับการเผาของเสีย เตาเผาแบบหมุนเป็นที่ นิยมสำหรับงานนี้เนื่องจากความยืดหยุ่นของเตา มันสามารถที่จะจัดการกับวัสดุหลากหลายที่ป้อนเข้า ไปกับค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงและไม่เป็นปัญหาเรื่องการกำจัดของเสียที่เป็นของแข็งที่ทางออก

2.4.5 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุน

ระหว่างกระบวนการทางความร้อนของวัสดุขนาดเล็กในเตาเผาแบบหมุนการแลกเปลี่ยน ความร้อนภายในชั้นวัสดุ เกิดขึ้นโดยกลไกที่เหมือนกันในหลายกลุ่มชั้นวัสดุ เส้นทางการแลกเปลี่ยน ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่าง อนุภาค กับ อนุภาค จะเป็นการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ตลอดจนช่องแคบเล็กๆระหว่าง แก๊สกับอนุภาค จะเป็นการพาความร้อนดังแสดงในรูป 2.13

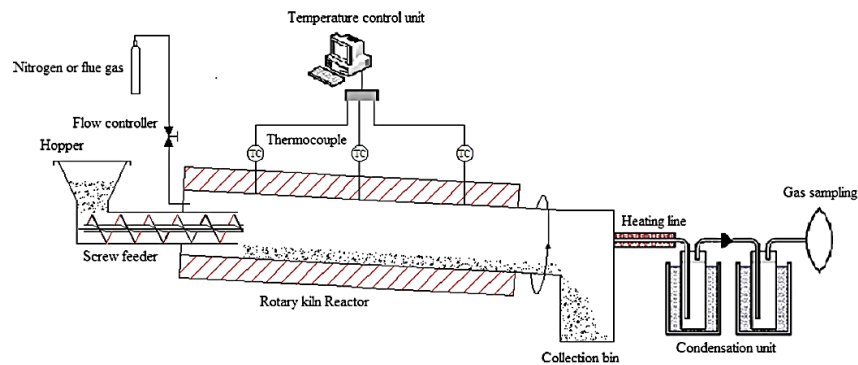


รูปที่ 2.13 เส้นทางการแลกเปลี่ยนความร้อนของชั้นวัสดุ

1. การนำความร้อนภายใน
 2. การนำความร้อนระหว่างอนุภาคกับอนุภาค
 3. การแผ่รังสีความร้อนระหว่างอนุภาค กับ อนุภาค
 4. การพาความร้อนผ่านช่องแคบเล็กๆ
- ที่มา “Rotary Kilns transport phenomena and transport processes”

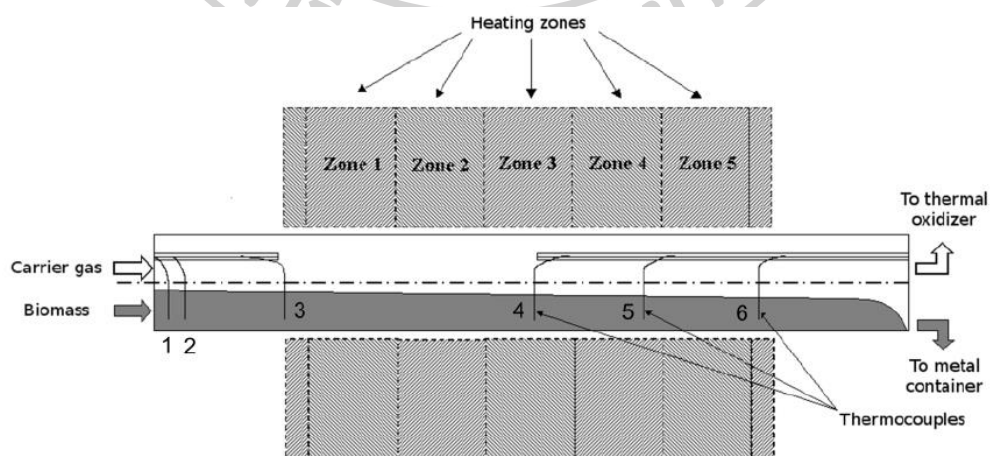
2.5 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

Mei et al. (2014) ได้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟคชั่น ของไม้ซีดาร์จะดำเนินการใน เตาเผาแบบหมุนขนาดกึ่งห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิต่างกัน (200, 230, 260 และ 290 องศาเซลเซียส) การทอรีแฟคชั่นมีผลต่อคุณสมบัติเกี่ยวกับ ประสิทธิภาพการอบ, ความไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะถูก พิสูจน์และลงรายละเอียดรวมถึงการเผาไหม้ด้วย แต่มันกลับกลายเป็นว่าสามารถเทียบได้กับชีวมวล ดิบในเรื่องของ ประสิทธิภาพการอบ, ความไม่ชอบน้ำ มันมีการปรับปรุง การเพิ่มอุณหภูมิของ กระบวนการทอรีแฟคชั่นส่งผลให้เกิดการลดลงของการใช้พลังงานในการอบ การใช้ก๊าซไอเสีย อุตสาหกรรมมีความสำคัญ และมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของไม้ซีดาร์ระหว่างทอรีแฟคชั่นกับคุณสมบัติ ของผลผลิต เพื่อเพิ่มความหนาแน่นทางพลังงานและผลผลิต อุณหภูมิของการทอรีแฟคชั่น ควร ควบคุมภายใน 260 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ตัวอย่างการเผาไหม้ของชีวมวลทอรีไฟร์ส่วนใหญ่เป็น การเผาไหม้ที่มีลักษณะคล้ายกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากถ่านลิกไนต์ โดยเตาเผาแบบหมุนที่ใช้ในการ ทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.14 [23]



รูปที่ 2.14 รูปการออกแบบของระบบเตาทอรีแฟคชั่นแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นไม้ซีดาร์

Colin et al. (2014) ได้ศึกษาการทอรีแฟคชั่น beech chips ในเตาเผาแบบหมุนกึ่งปฏิบัติการ ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการทำงาน (อุณหภูมิ, ระยะเวลาดำเนินงาน และปริมาณของแข็ง บน อุณหภูมิของชั้นวัสดุของแข็งตามเตาเผาและผลได้เชิงมวลของกระบวนการถูกประเมินค่า มันถูกตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของระดับอุณหภูมิหรือระยะเวลาดำเนินการที่นำไปสู่การลดลงของผลได้เชิงมวลของกระบวนการ นอกจากนี้มันมีหลักฐานแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณของแข็ง ที่การลดลงของผลได้เชิงมวลเหมือนกัน การศึกษาอุณหภูมิตามเตาเผา มีการเปิดใช้งานเพื่อค้นหา โซนอบแห้ง โซนทอรีแฟคชั่น การทอรีแฟคชั่นเริ่มต้นในจุดสุดท้ายที่สามของโซนให้ความร้อน นอกจากนี้ยังถูกตั้งข้อสังเกตว่า ปริมาณของแข็ง เป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดความร้อนซ้ำของชีวมวลในด้านอื่นๆ สำหรับอุณหภูมิที่สูงหรือ ปริมาณของแข็งที่มาก อุณหภูมิของชีวมวลจะเกินกว่าอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งหลักฐานที่เกิดขึ้นเกิดจากของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดความร้อนขึ้น [24]

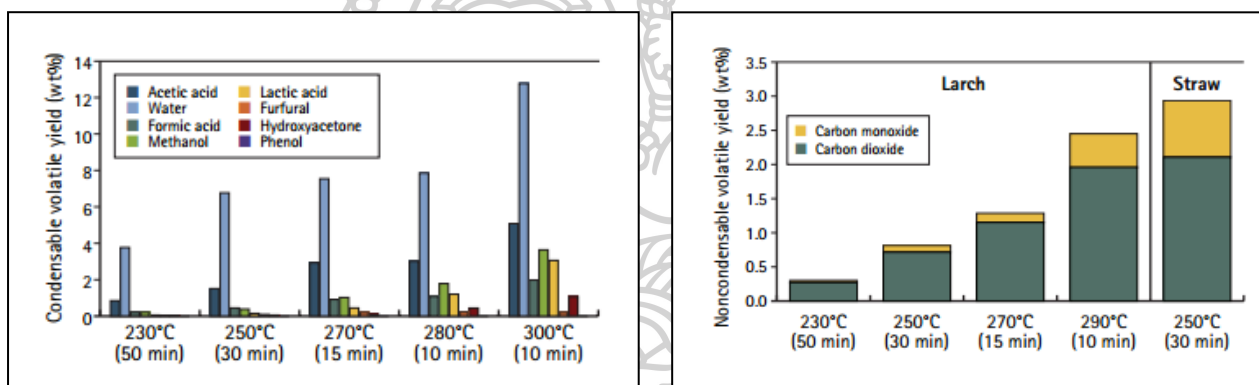


รูปที่ 2.15รูปแสดงแผนผังเตาทอรีแฟคชั่นแบบหมุนกึ่งห้องปฏิบัติการสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น beech chips

2.6 แก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชัน (torrefaction gas)

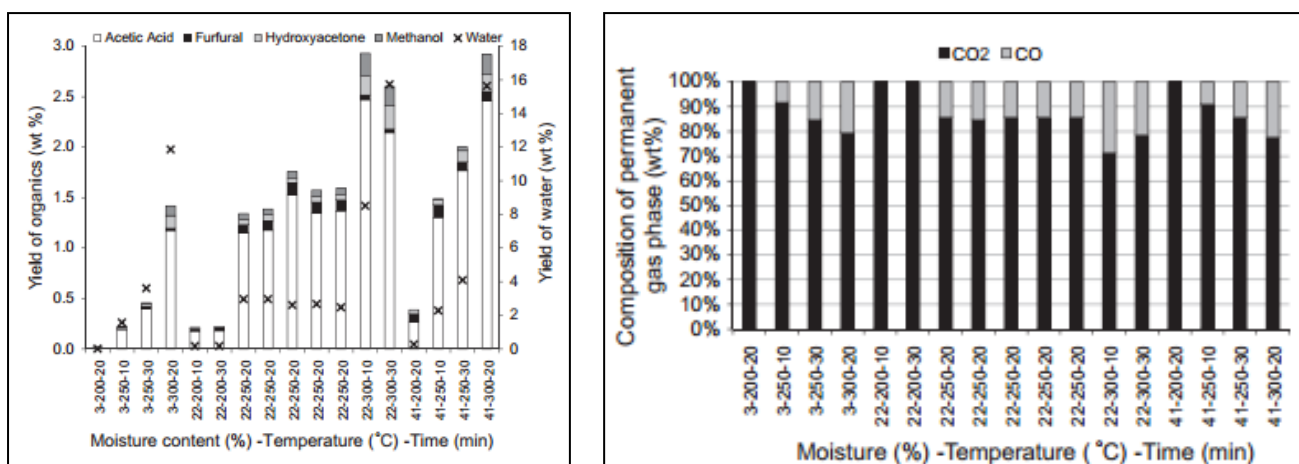
การให้ความร้อนแก่ชีวมวลระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชัน เป็นผลให้เกิดแก๊สจากชีวมวลซึ่ง ส่วนประกอบหลักของแก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชันคือ น้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปริมาณ ของแก๊สที่ปลดปล่อยมานั้นขึ้นอยู่กับ อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล อุณหภูมิที่ใช้ในการทอรี แฟคชัน เวลาที่เกิดปฏิกิริยาการทอรีแฟคชันและส่วนประกอบของชีวมวล

Tumuluru et al. (2011) ได้ทำการศึกษาแก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยนำ แก๊สที่ได้มาจากกระบวนการทอรีแฟคชันมาควบแน่น โดยผลที่ได้จากการควบแน่นนั้นจะมีทั้งส่วนที่ ควบแน่นได้ และส่วนที่ควบแน่นไม่ได้ ส่วนที่ควบแน่นได้นั้นจะมีลักษณะเป็นของเหลว ประกอบด้วย กรดแอซิดิก กรดแลคติก น้ำ กรดฟอร์มิก ไฮดรอกซีอะซิโตน เมทานอล และฟีนอล ส่วนที่ควบแน่น ไม่ได้จะอยู่ในสถานะแก๊ส ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ [25]



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของแก๊สทอรีแฟคชันที่ถูกควบแน่น และ ไม่ถูกควบแน่น

Medic et al. (2012) ได้ทำการศึกษาผลของการทอรีแฟคชันต่อการเพิ่มประสิทธิภาพใน การเก็บรักษา โดยพบว่าในกระบวนการทอรีแฟคชันนั้น มีการเกิดแก๊สขึ้นระหว่างกระบวนการ โดย แก๊สที่เกิดจากกระบวนการจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ควบแน่นได้ และส่วนที่ควบแน่นไม่ได้ โดยใน งานวิจัยจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อการปลดปล่อยแก๊สมากยิ่งขึ้น [26]



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของแก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ถูกควบแน่นและไม่ถูกควบแน่น

2.7 ส่วนประกอบของแก๊สที่ถูกควบแน่น

- กรดแอซิดิก เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นฉุน แสบจมูก ระเหยได้ น้ำหนักโมเลกุล 60.05 จุดเดือด 118 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็งที่ 17 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 1.05 ความดันไอ 11 มม. ของปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส ละลายน้ำได้ดี มีความเสถียร กรดแอซิดิกบริสุทธิ์ เรียกว่า กรดน้ำส้มล้าง หรือกรดกลูตาซีอะซิดิก ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 17 องศาเซลเซียส การเจือจางกรดด้วยน้ำ ได้น้ำส้มสายชูสำหรับปรุงอาหาร ซึ่งอาจได้จากการหมัก มีกลิ่นหอมและไม่มีอันตรายจากสารปนเปื้อน

- เมทานอล หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ มีสูตรโครงสร้างแบบย่อ CH_3OH เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย เป็นพิษ นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และใช้เป็นเชื้อเพลิง ในธรรมชาติ เมทานอลเป็นผลิตภัณฑ์จากการสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียหลายชนิด (ดูการผลิตเมทานอล จากของเสียเพื่อทำเป็นก๊าซชีวภาพ) ซึ่งเมทานอลจะระเหยออกสู่อากาศภายนอก แล้วสลายตัวได้ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

- กรดฟอร์มิก เป็นกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่งอาจเรียกว่า กรดเมทาโนอิก เป็น กรดคาร์บอกซิลิก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุด มีสูตรโมเลกุลคือ HCOOH กรดฟอร์มิก อาจเกิดจากการสังเคราะห์โดย จุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก การเผาไหม้ไม้เพื่อการรมควัน กรดฟอร์มิก มีกลิ่นฉุนและแสบจมูก แต่เอทิลเอสเทอร์ของกรดนี้มีกลิ่นคล้ายผลไม้

- กรดแลคติก เป็นกรดที่ผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีหรือการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ มีลักษณะเป็นของเหลวไม่มีสี ละลายในน้ำ และตัวทำละลายได้ดี และสามารถตกผลึกได้หากมีความเข้มข้นสูง

2.8 ส่วนประกอบของแก๊สที่ไม่ถูกควบแน่น

- คาร์บอนมอนนอกไซด์ มีสูตรทางเคมี "CO" เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส แต่มีความเป็นอันตรายอย่างร้ายแรงต่อระบบลำเลียงเลือด โมเลกุลประกอบไปด้วยคาร์บอนหนึ่งอะตอมและออกซิเจนหนึ่งอะตอมเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบแอนไฮไดรด์อย่างหนึ่งของกรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน โดยเฉพาะเครื่องยนต์สันดาปภายใน คาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดได้มากเมื่อออกซิเจนไม่เพียงพอในการสันดาป คาร์บอนมอนอกไซด์สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เผาไหม้ในอากาศจะเกิดเปลวเพลิงสีน้ำเงินและให้คาร์บอนไดออกไซด์ออกมา แม้ว่าจะมีความเป็นพิษอย่างร้ายแรงคาร์บอนมอนอกไซด์ก็มีประโยชน์ในโลกปัจจุบันอย่างมากเพราะเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างอื่นนานาชนิด เช่น จากรถ บุหรี่ เป็นต้น

- คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ CO_2 เป็นก๊าซไม่มีสี ซึ่งหากหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปาก เกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ เนื่องจากอาจเกิดการละลายของแก๊สนี้ในเมือกในอวัยวะ ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกอย่างอ่อน คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น 1.98 kg/m^3 ซึ่งเป็นประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ โมเลกุลประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) หรือ CO_2 น้ำหนักโมเลกุล 44.01 ไม่ติดไฟและไม่ทำปฏิกิริยา

2.9 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์

สมดุลมวลสารเป็นพื้นฐานของการออกแบบและควบคุมกระบวนการต่างๆ โดยการทำให้สมดุลมวลสาร จะทำให้ทราบปริมาณวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการและผลผลิตที่จะได้มีปริมาณเท่าใด พื้นฐานในการคำนวณจะใช้หลักของ “ กฎการอนุรักษ์มวลสาร (The law of conversation of mass) ” กฎนี้กล่าวไว้ว่า มวลสารของระบบหนึ่งๆ จะต้องคงที่เสมอ ไม่ว่าจะภายในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้น มวลสารไม่มีวันสูญหาย

สมดุลมวลที่นำมาวิเคราะห์ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นและกระบวนการควบแน่น คือ มวลของวัตถุดิบ เข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่น 100 % ผ่านกระบวนการจะได้ผลิตภัณฑ์ 3 ส่วน ได้แก่ ชีวมวลทอรีไฟร์, ของเหลว และแก๊ส

2.10 ระยะเวลาในการดำเนินการโดยเฉลี่ย (Mean Resident Time, MRT)

2.10.1 ความหมายของระยะเวลาในการดำเนินการโดยเฉลี่ย

ระยะเวลาการดำเนินการโดยเฉลี่ย คือ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของสิ่งต่างๆตั้งแต่เริ่มดำเนินการจนถึงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงครั้งแรกในที่นี้จะกล่าวถึงลักษณะของระยะเวลาในการ

ดำเนินการของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุนโดยระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนจะหมายถึงระยะเวลาตั้งแต่วัสดุถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาจนกระทั่งวัสดุเคลื่อนที่ออกจากเตาเผาแบบหมุน

2.10.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ย

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่ามีตัวแปรที่พบในสมการหลายตัวแปร โดยจะเห็นว่าทุกตัวแปรจะมีผลต่อระยะเวลาดำเนินการเฉลี่ย ซึ่งตัวแปรที่เห็นก็จะมาจากหลายปัจจัยได้แก่

2.10.2.1 ปัจจัยเนื่องมาจากขนาดของเตาเผา

- ความยาวของเตา (L) ความยาวของเตานั้นส่งผลกับระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ อย่างแน่นอนเพราะจากความเป็นจริงแล้วถ้าความยาวเตายิ่งมากค่าของระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการก็จะมากตามไปด้วยแต่ถ้าความยาวเตาน้อยค่าของระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการก็จะน้อยตามไปด้วย

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา (D) ยิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผามากจะส่งผลให้ระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยน้อย เป็นผลมาจากการกระจายตัวของชีวมวลภายในเตาเผา

2.10.2.2 ปัจจัยเนื่องมาจากตัวแปรในการดำเนินงาน

- อัตราการป้อน (V) อัตราการป้อนจะส่งผลน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆที่กล่าวมา โดยอัตราการป้อนจะส่งผลกับระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการแค่ในช่วงแรกเท่านั้นหลังจากป้อนชีวมวลหมดแล้วก็จะไม่ส่งผลอะไรกับค่าของระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

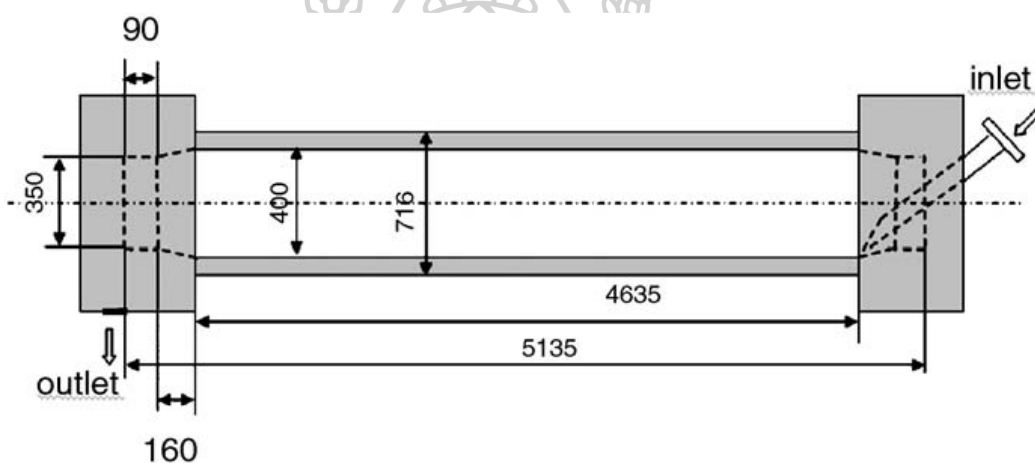
- ความเร็วรอบในการหมุนของเตา (n) ความเร็วรอบในการหมุนของเตานั้นจะส่งผลวัสดุออกจากเตานั้นออกมาเร็วหรือช้าได้ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการหมุนของเตาโดยจากสมการจะเห็นว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนเตาเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการเฉลี่ยของเตาเผาที่มีค่าลดลง

- องศาของเตาเผา (β) องศาของเตาเผานั้นส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการแน่นอนเนื่องจากถ้าเตาเอียงมากๆ หรือองศาของเตามากๆ วัสดุก็จะออกมาเร็วกว่าทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการน้อยแต่ถ้าเตาเอียงน้อยๆ หรือองศาของเตาน้อยๆ วัสดุก็จะออกมาช้ากว่าทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการมากขึ้น

ในงานวิจัยของ Liu et al. (2006) ใช้เตาเผาชนิดโรตารีตามรูปที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ



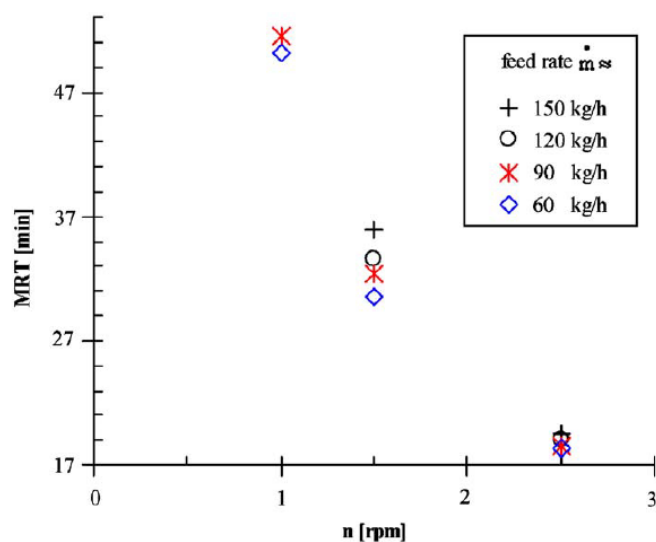
รูปที่ 2.18 เตาเผาชนิดโรตารีที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.19 ขนาดของเตาเผาชนิดโรตารีที่ใช้ในการทดลอง

ท่อเตาทรงกระบอกประกอบด้วยเปลือกนอกที่เป็นเหล็กติดตั้งอิฐทนไฟที่ด้านในของผนังท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 400 มิลลิเมตร และมีความยาว 4635 มิลลิเมตร ซึ่งคิดอัตราส่วน ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 11.6 ที่จุดปลายท่อทั้งสองด้านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ลดลงเหลือ 350 มิลลิเมตร เตาเผาสามารถโน้มเอียงได้เป็นมุมระหว่าง -5° ถึง 5° ค่าความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาสามารถปรับค่าได้ระหว่าง 0 ถึง 10 รอบต่อนาที วัสดุจะถูกป้อนเข้าเตาเผาอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องป้อน loss-in-weight ค่าอัตราการป้อนสามารถปรับได้ระหว่าง 1.55 ถึง 990 กิโลกรัมต่อชั่วโมง การทดลองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องและใช้ทรายเป็นวัสดุในการทดสอบ (เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 0.366 มิลลิเมตร ความหนาแน่นบักก์เท่ากับ 1370 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมุมรีโพลของวัสดุเท่ากับ 33°)

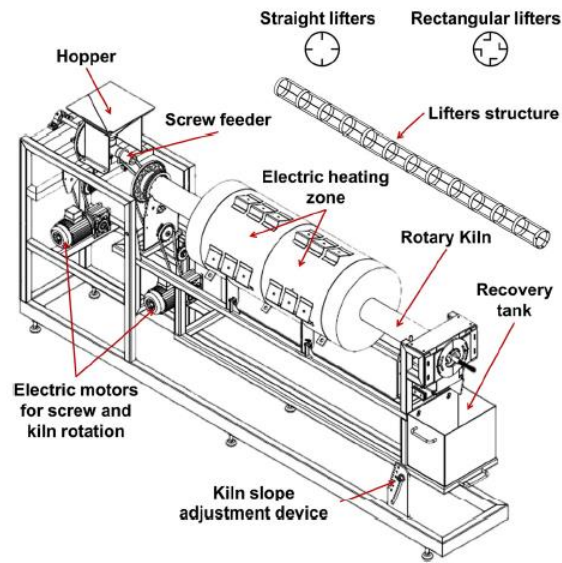
ในการทดลอง Liu et al. (2006) ได้ทดลองที่ค่าความโน้มเอียงของเตา (β) ที่ 3° และจะปรับเปลี่ยนความเร็วรอบในการหมุนของเตา (n) ระหว่าง 1 ถึง 2.5 รอบต่อนาที และจะปรับเปลี่ยนอัตราการป้อน (\dot{M}) ระหว่าง 60 ถึง 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [27]



รูปที่ 2.20 ผลของความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผา (n) และอัตราการป้อน (\dot{M}) ที่ส่งผลต่อค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ย

ค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยแสดงที่ค่าความเร็วรอบและค่าอัตราการป้อนที่แตกต่างกัน ปรากฏว่าค่าความเร็วรอบในการหมุนของเตา (n) มีผลต่อค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยมากกว่าอัตราการป้อน (\dot{M}) ค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็วจาก 50 จนถึง 18 นาที เมื่อความเร็วรอบเพิ่มจาก 1 จนถึง 2.5 รอบต่อนาที และค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มจาก 60 จนถึง 150 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.20

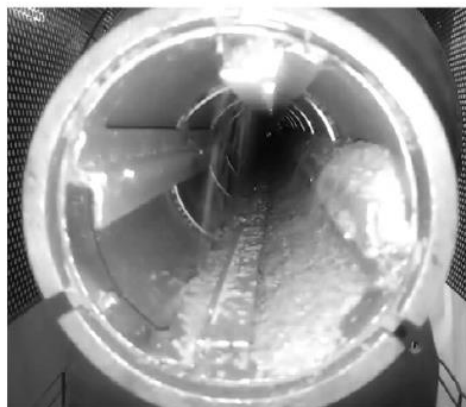
จากการศึกษาของ Njeng et al. (2015) ดำเนินการทดลองผ่านเตาเผาชนิดโรตารีตามรูปภาพที่ 2.21 เตาเผามีความยาวของท่อทรงกระบอก 1.95 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 0.1013 เมตร ติดตั้งจุดทางออกชีวมวลสูงตั้งแต่ 0-33.5 เมตร ติดตั้งชุดลิฟเตอร์ 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบไม่ติดตั้งลิฟเตอร์, ลิฟเตอร์แบบตรง (Straight Lifter; SL), ลิฟเตอร์แบบมุมฉาก (Rectangular Lifter; RL) ซึ่งปรากฏไว้ในรูปภาพที่ 2.22 เตาเผาสามารถปรับมุมโน้มเอียงได้ระหว่าง 2° ถึง 5° ค่าความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาสามารถปรับค่าได้ระหว่าง 2 และ 12 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชีวมวลสามารถปรับค่าได้ระหว่าง 0.68 ถึง 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ใช้ทรายและข้าวหักเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คุณสมบัติของทรายและข้าวหักสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 [20, 21]



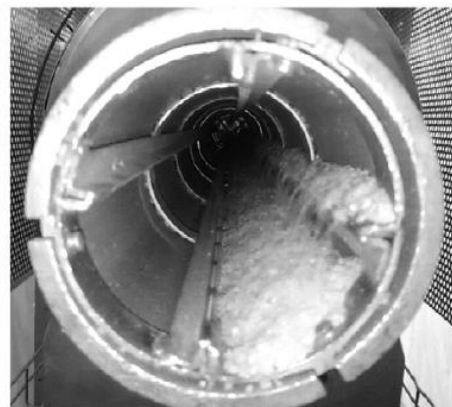
รูปที่ 2.21 แบบของอุปกรณ์ทดสอบ รวมถึงโครงสร้างและรูปร่างของใบกวน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Product	Shape	ρ_{bulk} [kg/m ³]	ρ_{tapped} [kg/m ³]	d_p [mm]	θ [°]
Sand	Nodular	1422	1543	0.55	39
NaCl	Nodular	1087	1184	0.6	35.4
Broken rice	Cylindrical	889	934	3.8 × 1.9	36



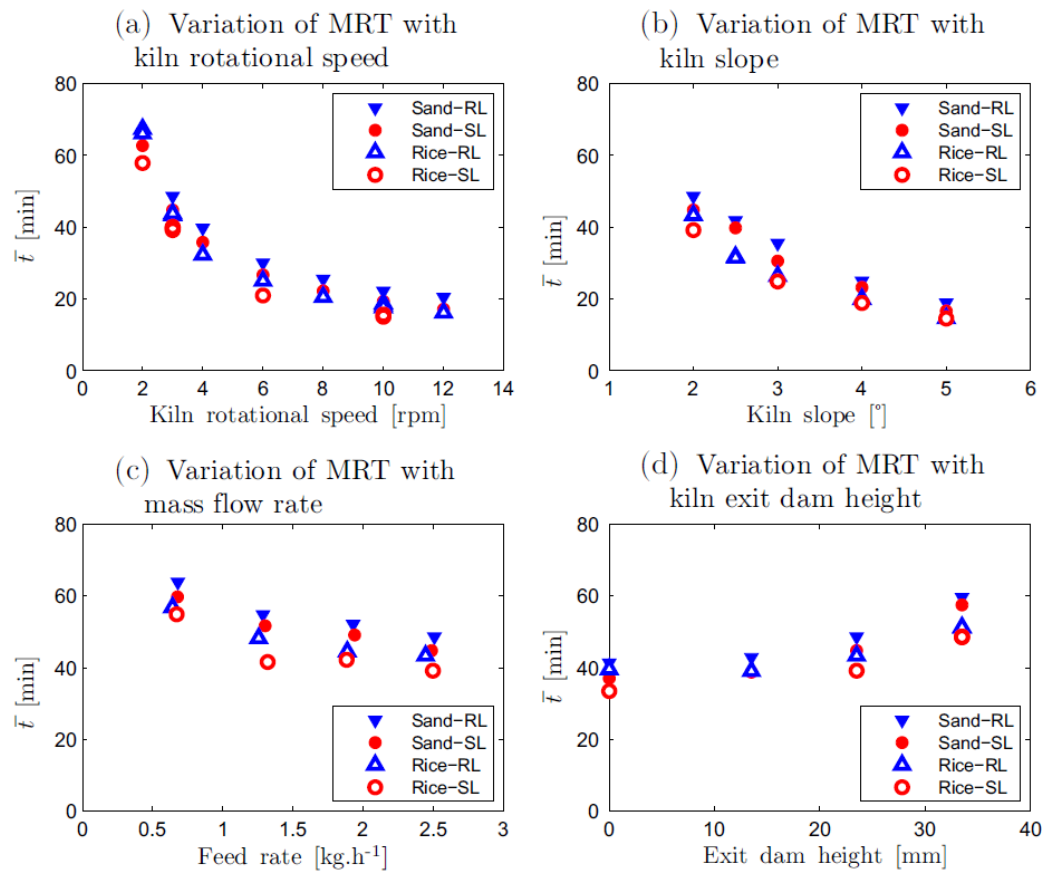
(a) Rectangular lifters



(b) Straight lifters

รูปที่ 2.22 เตาเผาแบบหมุนสำหรับทดสอบซึ่งติดตั้งลิฟเตอร์

a) ลิฟเตอร์แบบมุมฉาก และ b) ลิฟเตอร์แบบตรง วัสดุคือข้าวหัก



รูปที่ 2.23 ผลของตัวแปรที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการ

(a ผลของความเร็วยกที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการ b ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการ c ผลของอัตราการป้อนที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการ d ผลของค่าความสูงที่จุดทางออกชีวมวลที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการ)

- ความเร็วยกการหมุนของเตาเผา ในขณะที่ผลการทดลองแสดงในรูปภาพที่ 2.23a การเพิ่มความเร็วยกการหมุนของเตาเผาจาก 2 ถึง 12 รอบต่อนาที เป็นสาเหตุอย่างชัดเจนที่ทำให้ระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยการไหลของข้าวหักและทรายมีค่าลดลง ค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยการไหลของข้าวหักและทรายจะลดลงในช่วงเวลาจาก 50-70 นาที จนถึง 10-30 นาที เมื่อความเร็วยกการหมุนของเตาเผาเพิ่มขึ้นจาก 2 รอบต่อนาทีเป็น 12 รอบต่อนาที ในกรณีเตาเผาติดตั้งลิฟต์แบบตรงและแบบหมุนฉาก

- มุมโน้มเอียงของเตาเผา แม้ว่าในทางอุตสาหกรรมบางอย่างใช้เตาเผาแบบหมุนแบบแนวระนาบ แต่เตาเผาส่วนใหญ่ถูกออกแบบให้ทำงานในตำแหน่งลาดเอียงเพื่อความรวดเร็วในการส่งผ่านวัสดุภายในเตาเผา ในงานวิจัยนี้จะทดลองและเปรียบเทียบค่าระยะในการดำเนินการเฉลี่ยการไหลของข้าวหักและทรายกับเตาเผาที่มีมุมโน้มเอียงระหว่าง 2° ถึง 5° ผลการทดลองแสดงดังรูปภาพที่

2.23b ค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยจะลดลงในช่วงเวลาจาก 40-50 นาที จนถึง 10-20 นาที เมื่อมุมโน้มเอียงของเตาเผาเพิ่มขึ้นจาก 2° ถึง 5° ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของมุมโน้มเอียงของเตาเผาจะส่งผลให้ระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยลดลง

- อัตราการป้อนชีวมวล ผลการทดลองแสดงในรูปภาพที่ 2.23c เมื่ออัตราการป้อนชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 0.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ถึง 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะส่งผลให้ค่าระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยการไหลของข้าวหักและทรายจะลดลงในช่วงเวลาจาก 50-70 นาที จนถึง 30-50 นาที การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนชีวมวลจะส่งผลให้ระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยลดลง แต่อัตราการป้อนชีวมวลจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [20, 21]

ธีรยุทธ และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาผลของ ความเร็วรอบ มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน ที่มีผลต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน โดยในการทดลองได้ใช้เตาเผาที่มีความยาว 6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร จำนวนใบกวนของเตาเผาแบบหมุน 2 ใบ โดยในการทดลองนั้นใช้ชีวมวลในการทดลองทั้งหมด 3 ชนิด คือ กะลาปาล์ม ชังข้าวโพด และ กระจิน ในในการทดลองนี้ ได้ใช้ความเร็วรอบจำนวน 3 ค่า คือ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที และมุมเอียงของเตาเผา 3 ค่า คือ 1 3 และ 5 องศา จากการทดลองพบว่า ชีวมวลทั้ง 3 ชนิดนั้นมีแนวโน้มของระยะเวลาดำเนินการไปในทางเดียวกัน โดยเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินงานของเตาเผาแบบหมุนนั้นน้อยลง และพบว่าเมื่อมุมเอียงของเตาเผาแบบหมุนนั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการนั้นน้อยลงไปด้วย [28]

2.10.2.3 ปัจจัยเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุ

- มุมรีโพลของวัสดุที่ทำกับเตา (θ) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ดำเนินการเนื่องจากเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อมุมวัสดุที่ทำกับเตาเพิ่มขึ้นเช่นกัน

- ขนาดของวัสดุ (d_p) ขนาดของวัสดุจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ภายในเตาเผาและยังส่งผลกับมุมรีโพลของวัสดุที่กระทำกับเตาเผาแบบหมุนด้วย

2.10.2.4 ปัจจัยเนื่องมาจากส่วนประกอบภายในเตาเผาแบบหมุน

- ใบกวน (Lifter) ใบกวนทำหน้าที่กระจายชีวมวลให้ชีวมวลอยู่เป็นระนาบตลอดทั้งเตาเผาทำให้การทอริไฟร์ชีวมวลมีประสิทธิภาพมากขึ้นและทำให้ระยะเวลาในการดำเนินการเฉลี่ยมากขึ้นเนื่องจากใบกวนจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของชีวมวล

ธิดินันท์ และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาผลของจำนวนใบกวนที่มีผลต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน โดยในการทดลองได้ใช้เตาเผาแบบหมุนที่มีความยาว 6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร โดยกะลาปาล์มได้ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้ โดยจำนวนใบกวนที่ใช้ในการทดลองคือ 0 ใบ และ 2 ใบ และทำการทดลองที่มุมเอียงของเตาเผา 1 3 และ 5 องศา ความเร็วรอบ 1 2 และ 3 รอบต่อนาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า จำนวนใบกวนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินงานของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น จากการทดลองระยะเวลาดำเนินงานของ 2 ใบกวน มีค่ามากกว่า 0 ใบกวน เนื่องมาจากในจังหวะที่ใบกวนเคลื่อนที่และตักชีวมวลขึ้นไปนั้น ชีวมวลจะหยุดนิ่งอยู่บนใบกวน ทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ไหลในแนวแกน ในขณะที่ 0 ใบกวน ชีวมวลจะเคลื่อนที่ไหลในแนวแกนตลอดเวลา ทำให้ระยะเวลาดำเนินงานของ 0 ใบกวนนั้นมีระยะเวลาที่น้อยกว่า 2 ใบกวน นอกจากนี้ มุมเอียงและความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้น ยังส่งผลต่อระยะเวลาดำเนินงานด้วย โดยเมื่อมุมของเตาเผาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการลดลงและเมื่อมุมเอียงของเตาเผาเพิ่มขึ้น ระยะเวลาดำเนินงานของเตาเผาก็ลดลงด้วยเช่นกัน [29]

2.11 ทฤษฎีบทกิงแฮม-พาย (Buckingham pi theorem)

การออกแบบวิศวกรรมเพื่อให้ได้ต้นแบบตามที่ต้องการ พฤติกรรมทางฟิสิกส์และวิศวกรรมจะถูกศึกษามาจากแบบจำลองโดยทั่วไปแบบจำลองจะมีขนาดเล็กกว่าต้นแบบ แต่ทำการทดลองการทำงานภายใต้สภาวะเดียวกับต้นแบบ ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลายๆตัวของแบบจำลองนั้นการวิเคราะห์เชิงมิติจะถูกนำมาใช้แทนการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีซึ่งยุ่งยากและไม่เหมาะสม พื้นฐานของการวิเคราะห์เชิงมิติคือการลดจำนวนตัวแปรที่มีหลายตัวของแบบจำลองหรือปัญหา เป็นกลุ่มของตัวแปรไร้มิติที่เป็นอิสระต่อกันที่เหลือจำนวนน้อยกลุ่มลง ในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีวิเคราะห์เชิงมิติที่นำมาใช้อย่างแพร่หลายคือ ทฤษฎีบทกิงแฮม-พาย [30, 31]

จากปัญหาทางกายภาพที่มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวน n ตัวโดยตัวแปรตามหนึ่งตัวที่เราสนใจเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระจำนวน $n-1$ ตัวเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นได้ดังนี้ $g = f(q_1, q_2, \dots, q_{n-1})$

โดย g คือ ตัวแปรตามที่เราสนใจ

q_1, q_2, \dots, q_{n-1} คือ ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตาม

ในทางคณิตศาสตร์เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบฟังก์ชันสมมูลได้ดังนี้ $g(q_1, q_2, \dots, q_{n-1}) = 0$ โดยฟังก์ชัน g เป็นฟังก์ชันที่ยังไม่ทราบรูปแบบและแตกต่างจากฟังก์ชัน f

ทฤษฎีบทกิงแฮม-พายจะไม่สามารถหาฟังก์ชัน g ได้ แต่จะทำการจัดรูปแบบตัวแปรทั้ง n ตัวให้เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติจำนวน $n-m$ กลุ่ม โดยเรียกกลุ่มเหล่านั้นว่ากลุ่มตัวแปรพาย ($\pi =$

parameter) ซึ่งจะเขียนในรูป $G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0$ หรือ $\pi_1 = G_1(\pi_2, \dots, \pi_{n-m})$ จำนวน m ปกติมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรอิสระ (หรือหน่วยพื้นฐาน) ที่น้อยที่สุดที่สามารถแสดงหน่วยของตัวแปรทุกตัวที่ใช้การวิเคราะห์ได้

ทฤษฎี Buckingham-พายนั้นไม่ได้วิเคราะห์รูปแบบของฟังก์ชัน G หรือ G_1 แต่จะหาเทอมของกลุ่มตัวแปรพาย $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}$ การหารูปแบบของฟังก์ชัน G นั้นต้องใช้ข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรพายที่สร้างขึ้น

การสร้างกลุ่มตัวแปรพายมีขั้นตอนทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังนี้

- (1) กำหนดพารามิเตอร์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบ ในขั้นตอนนี้อาจจะตัดพารามิเตอร์บางตัวออกไปเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น และกำหนดให้สัญลักษณ์ n แทนจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด
- (2) เลือกกลุ่มมิติพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น ระบบ M L t หรือ F L t
- (3) กำหนดมิติของพารามิเตอร์ทุกตัวในเทอมของมิติพื้นฐานที่เลือกใช้ และให้จำนวนสัญลักษณ์ m แทนจำนวนมิติพื้นฐาน
- (4) เลือกพารามิเตอร์จากกลุ่มพารามิเตอร์ในขั้นตอนที่ 3 เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ซ้ำ โดยทั่วไปจะเท่ากับจำนวนมิติพื้นฐาน
- (5) จัดสมการมิติโดยรวมพารามิเตอร์ซ้ำทั้งหมดกับพารามิเตอร์ที่เหลือทีละตัวเพื่อทำการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ โดยจะมีสมการที่จัดได้ทั้งหมด $n-m$ สมการ จากนั้นทำการแก้สมการพารามิเตอร์เหล่านั้นจะทำให้ได้กลุ่มตัวแปรไร้มิติ
- (6) ตรวจสอบความเป็นมิติของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้สร้างขึ้น

ตารางที่ 2.2 มิติของปริมาณทางกายภาพและหน่วยในระบบ SI

ปริมาณและคุณสมบัติ	หน่วย	สัญลักษณ์	มิติ	
			MLT	FLT
พื้นที่	m^2	A	L^2	L^2
ปริมาตร	m^3	V	L^3	L^3
ความเร็ว	m/s	v	LT^{-1}	LT^{-1}
ความเร่ง	m/s^2	a	LT^{-2}	LT^{-2}
ความเร็วเชิงมุม	rad/s	w	T^{-1}	T^{-1}
แรง	N	F	MLT^{-2}	F
มวล	kg	m	M	FT^2L^{-1}

ความดัน	N/m^2	p	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
กำลัง	Watt	P	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}
แรงบิด	Nm	T	ML^2T^{-2}	FL
อัตราการไหล	m^3/s	Q	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
น้ำหนัก	N	W	MLT^{-2}	F

2.12 วิธีการและสมการที่ใช้ในการหาระยะเวลาในการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาในการดำเนินการเหล่านี้ ถือว่าเป็นสมการต้นแบบในการทำวิจัยซึ่งจะใช้เปรียบเทียบกับระยะเวลาในการดำเนินการที่ถูกต้องจริง และจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการสัมพันธ์ที่ถูกต้องต่อไป

งานวิจัยของ Sullivan et al. (1927) เป็นการทดลองด้วยเตาเผาขนาดเล็ก โดยแบ่งเตาการทดลองออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ใช้เตายาวขนาด 7 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลางเตาขนาด 3-19 นิ้ว ใช้ศึกษาผลกระทบเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางเตา ชุดที่ 2 ใช้เตายาวขนาด 5 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลางเตาขนาด 3-19 นิ้ว โดยเตาจะมีส่วนประกอบหลักๆ ประกอบด้วย ฮีตเตอร์ไฟฟ้า จุดทางออกที่เปิดโล่ง และจะติดตั้งเครื่องป้อนวัสดุซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนได้ [32]

โดยการศึกษาผลของมุมโน้มเอียงเตาพบว่าระยะเวลาในการดำเนินการเป็นสัดส่วนแบบแปรผกผันกับมุมโน้มเอียงของเตา กล่าวคือถ้ามุมโน้มเอียงเตามากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการดำเนินการลดลง โดยการศึกษาจะปรับเปลี่ยนมุมโน้มเอียงเตาระหว่าง 1-6 องศา ความเร็วรอบในการหมุนของเตาถูกทำให้คงที่ที่ 2.5 รอบต่อนาที อัตราการป้อนอยู่ระหว่าง 3,585 – 4,300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และใช้วัสดุทดสอบเหมือนกันคือทราย ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองผลของมุมโน้มเอียงเตาที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการ

Angle, degrees	Feed in 15 minutes, c.c.	Time in kiln, minute
1	342	51.9
2	369	26.4
3	396	17.6
4	374	13.3
5	368	10.9
6	369	8.9

การศึกษาผลของอัตราการป้อนชีวมวล โดยจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนให้อยู่ในช่วง 9.007 - 3.013 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยที่ตัวแปรตัวอื่นจะถูกทำให้คงที่ โดยผลการทดลองพบว่า อัตราการป้อนชีวมวลมีผลกับระยะเวลาในการดำเนินการที่น้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลการทดลองผลของอัตราการป้อนชีวมวลที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการ

Feed in 15 minutes, c.c.	Time in kiln, minute
135.1	11.5
200.0	11.4
265.8	11.1
349.5	11.3
427.6	11.0
565.5	11.2
510.2	11.4

การศึกษาผลของความเร็รรอบในการหมุนของเตาเผา ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนความเร็รรอบในการหมุนของเตาเผา โดยที่ตัวแปรอื่นๆ จะถูกทำให้คงที่ ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาในการดำเนินการมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความเร็รรอบในการหมุนของเตา กล่าวคือที่ความเร็รรอบมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการดำเนินการน้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาในการดำเนินการกับความเร็รรอบ 2.0 และ 2.8 รอบต่อนาที

Angle, degrees	Time of passage at 2.8 rpm., minutes	Time of passage at 2.0 rpm, minutes	
		experiment	calculated
3	19.5	27.0	27.4
4	14.6	20.2	20.4
5	11.7	16.0	16.4
6	9.8	13.4	13.7
8	7.4	10.0	10.4
10	6.0	8.0	8.4
12	5.0	6.6	7.0

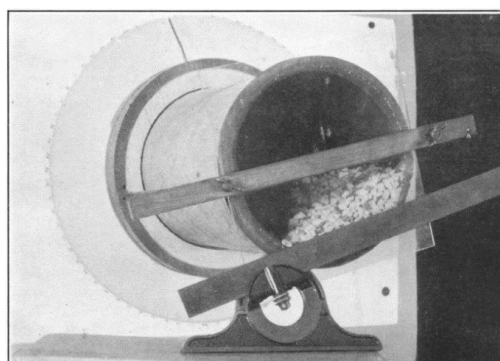
การศึกษาผลของความยาวเตา ผลของความยาวเตาแสดงชัดเจนด้วยตัวของมันเองอยู่แล้ว ความยาวของเตามีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการดำเนินการในรูปแบบแปรผันตรง ถ้าเตามีความยาวมากขึ้นก็จะแสดงว่าระยะเวลาในการดำเนินการส่งผ่านชีวมวลมากขึ้นเช่นกัน

การศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางเตา เส้นผ่านศูนย์กลางเตามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับระยะเวลาในการดำเนินการ กล่าวคือเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเตามากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการดำเนินการลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาในการดำเนินการกับเส้นผ่านศูนย์กลางเตาขนาด 6 นิ้ว และ 19 ¼ นิ้ว

Angle, degrees	Time of passage observed in 6-inch kiln, minute	Time of passage at 19 ¼ inch kiln, minutes	
		experiment	calculated
1	66.3	21.8	20.2
2	43.2	13.0	13.1
3	28.8	8.8	8.8
4	21.8	6.1	6.6
5	17.5	4.9	5.3
6	14.5	4.0	4.4

การศึกษามุมรีโพลของวัสดุที่อยู่ภายในเตาเผาแบบหมุน สามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของวัสดุที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มุมรีโพลเพิ่มขึ้นเช่นกัน การทดลองของ Sullivan et al. (1927) ใช้อุปกรณ์ดังรูปที่ 2.24 ในการวัดมุมรีโพลของวัสดุที่วางตัวอยู่ในเตาเผาแบบหมุน



รูปที่ 2.24 อุปกรณ์วัดมุมรีโพล

รูปแบบการสร้างสมการ Sullivan et al. (1927) จากผลการทดสอบผลของตัวแปรที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการสรุปได้ว่า

$$\text{MRT} \propto 1/B$$

$$\text{MRT} \propto 1/n$$

$$\text{MRT} \propto 1/D$$

$$\text{MRT} \propto L$$

MRT เป็นอิสระกับอัตราการป้อน

เมื่อให้ K เป็นค่าคงที่จะสามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$K = \frac{(\text{MRT})(\beta)(D)(n)}{L} \quad (2.8)$$

โดยที่ค่ามุมรีโพลของวัสดุและค่าคงที่ K จะถูกวัดและคำนวณที่มุมโน้มเอียงเตา 2 - 8 องศา โดยทดลองกับเตาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 นิ้ว และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟ $\log K - \log \theta$ โดยกราฟที่สร้างได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกราฟเส้นตรง โดยผลการวัดและคำนวณแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ K และค่ามุมรีโพล

Material	θ	$\text{Log}_{10} \theta$	k	$\text{Log}_{10} \theta k$
Lead shot	24.4	1.3874	7.19	0.8567
Millet seed	32.8	1.5159	9.00	0.9542
Ottawa standard sand (20-20 mesh)	34.4	1.5366	9.96	0.9983
River sand (20-50 mesh)	38.7	1.5877	10.64	1.0269
Quartz (20-30 mesh)	40.6	1.6085	10.92	1.0382
Coal (20-30 mesh)	41.7	1.6201	11.25	1.0512
Copper slag (20-30 mesh)	42.4	1.6274	10.96	1.0398
Stibnite (20-30 mesh)	42.5	1.6294	11.14	1.0469
Coke (20-30 mesh)	44.3	1.6464	11.85	1.0737
Beet seed	50.9	1.7067	11.49	1.0603
sawdust	55.6	1.741	12.40	1.0934

กราฟที่สร้างได้มีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรง และสามารถสร้างสมการจากกราฟได้เป็น

$$K = a\theta^n \text{ เมื่อ } n \text{ เป็นความชันกราฟ}$$

$$\text{หรือ } \log K = \log a + n \log \theta$$

$$\text{ให้ } X = \log K$$

$$Y = \log \theta$$

$$\text{เมื่อ } X_2 = 1.733 ; Y_2 = 1.10$$

$$X_1 = 1.530 ; Y_1 = 1.00$$

$$Y = nX + b$$

$$n = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

$$\frac{1.10 - 1.00}{1.733 - 1.53} = 0.492 = n$$

$$1.0 = (0.492)(1.53) + \log a$$

$$\log a = 0.2472, a = 1.77$$

$$K = 1.77\theta^{0.492}$$

$$\text{หรือประมาณว่า } K = 1.77\sqrt{\theta}$$

และได้สมการสุดท้ายเป็น
$$MRT = (1.77)\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{\sqrt{\theta}}{nB}\right) \quad (2.9)$$

การทดลองของ Chatterjee et al. (1983) เป็นการทดลองเตาเผาแบบหมุนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมถ่านหินในประเทศอินเดีย โดยการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรได้ถูกแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนแรก เป็นการศึกษาผลของตัวแปรที่เกิดจากเงื่อนไขการทำงาน ส่วนต่อมาเป็นการศึกษาผลของตัวแปรที่เกิดจากเงื่อนไขการติดตั้งของเตาเผา โดยทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้อง และใช้วัสดุในการทดลองเป็นผงเหล็ก ขนาด 3 - 6 มิลลิเมตร ความหนาแน่นรวม 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [33, 34]

การทดลองส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของตัวแปรเงื่อนไขการทำงาน เช่น ความเร็วในการหมุนของเตา (n) และองศาความโน้มเอียงของเตาเผา (β) โดยการทดลองส่วนนี้นั้นจะศึกษาที่ความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผา 0.3 - 0.7 รอบต่อนาที โดยจะเพิ่มความเร็วรอบครั้งละ 0.1 รอบต่อนาที ส่วนองศาความโน้มเอียงของเตานั้นจะศึกษาที่ 1 - 3 องศา เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 องศา อัตราการป้อนของวัสดุคงที่ ที่อัตรา 0.5 กิโลกรัมต่อนาที และจะทดลองกับเตาเผาแบบหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) ขนาด 300 มิลลิเมตร มีความยาว (L) 2000 มิลลิเมตร คิดเป็นอัตราส่วน L/D เท่ากับ 6.67 มีการติดตั้งจุดกั้นทางออกของชีวมวล 6 รูปแบบ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 รายละเอียดจุดกั้นทางออกชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง

Type of dam	Dam height, mm	Effective open diameter, mm	Pct diameter covered	Pct area covered	Bed angle, deg	Effective pct loading
A	0	300	0	0	0	0
B	15	270	10	19	51.7	1.87
C	30	240	20	36	73.7	5.20
D	45	210	30	51	91.2	9.41
E	60	180	40	64	106.3	14.24
F	75	150	50	75	120.0	19.55

สำหรับการบันทึกค่าผลของระยะเวลาในการดำเนินการ ระยะเวลาจะถูกบันทึกตั้งแต่ป้อนวัสดุที่จุดป้อน จนกระทั่งวัสดุถูกส่งผ่านไปจนถึงจุดออกของวัสดุ ส่วนค่าการกอดตัวของวัสดุ (hold-up) จะถูกวัดโดยการชั่งน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุภายในเตาเมื่ออยู่ในสภาวะคงที่ และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ผลของมุมโน้มเอียงเตาและความเร็วรอบในการหมุนของเตาที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการดำเนินการและค่าการกอดตัวของวัสดุ

Type of dam	Kiln rpm	Kiln inclination angle									
		1.0 deg		1.5 deg		2.0 deg		2.5 deg		3.0 deg	
		(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
A	0.3	111	47.0	84	49.0	69	40.2	59	32.5	55	25.8
	0.4	77	44.0	65	39.4	55	27.4	53	26.5	54	22.0
	0.5	54	31.0	53	32.6	50	23.4	44	19.0	39	14.8
	0.6	51	29.4	43	27.4	39	21.0	39	13.0	30	10.4
	0.7	51	28.0	42	22.4	35	19.8	28	12.0	23	10.0
B	0.3	120	51.5	111	55.2	79	50.2	73	40.5	66	33.0
	0.4	88	45.6	75	37.4	66	33.8	58	31.5	54	25.0
	0.5	69	35.0	56	30.2	54	28.6	47	25.0	47	16.5
	0.6	64	30.7	55	31.0	51	20.4	42	17.0	33	14.0

	0.7	55	30.5	45	26.0	40	20.6	39	14.0	34	12.2
C	0.3	140	59.0	118	59.2	90	57.6	81	45.5	74	36.0
	0.4	109	54.0	86	51.0	79	38.0	69	35.5	57	28.0
	0.5	83	49.2	72	43.6	61	32.8	58	27.8	49	21.0
	0.6	79	39.2	62	39.0	55	29.0	47	20.5	38	18.0
	0.7	70	37.0	61	33.8	50	28.0	43	20.0	36	16.0
D	0.3	150	63.5	142	64.0	102	62.0	98	52.5	80	44.0
	0.4	116	62.0	92	54.4	88	44.0	90	42.0	70	35.6
	0.5	105	56.7	83	54.0	78	39.4	71	32.0	66	30.8
	0.6	104	50.6	74	45.2	64	38.5	63	28.0	50	23.0
	0.7	83	50.2	71	42.6	60	32.0	60	29.5	41	21.0
E	0.3	178	72.0	171	72.2	119	70.4	111	63.5	100	49.5
	0.4	158	70.0	136	65.0	97	53.0	95	49.0	88	43.0
	0.5	148	69.0	98	63.0	89	50.0	87	42.7	75	39.5
	0.6	120	67.0	92	58.0	81	47.0	76	40.2	62	30.0
	0.7	110	63.0	89	52.0	75	42.8	69	36.0	54	28.0
F	0.3	254	81.5	179	81.8	145	80.8	128	72.0	125	62.5
	0.4	212	80.0	140	78.0	118	66.0	106	58.0	97	50.5
	0.5	162	75.5	128	74.0	98	62.0	98	55.2	89	48.5
	0.6	137	78.0	125	73.0	86	53.2	94	48.5	86	42.0
	0.7	131	78.0	116	66.5	82	50.0	97	46.7	77	43.2
(a) residence time, minute (b) hold up, kg											

การทดลองในส่วนที่สอง จะศึกษาผลของตัวแปรของลักษณะเตาโดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตรา การป้อนตั้งแต่ 0.25 - 1.25 กิโลกรัมต่อนาที และเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน L/D ตั้งแต่ 3.3 - 16 โดย ในการทดลองส่วนนี้จะถูกแบ่งเป็นสองส่วนย่อยตามการเปลี่ยนแปลงความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในของเตา ส่วนที่ 1 ความยาวของเตาจะถูกทำให้คงที่ที่ 2000 มิลลิเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในเตาจะถูกปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 200 - 600 มิลลิเมตร โดยผลของอัตราส่วน L/D เป็น 3.3 - 10.0 ในส่วนที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาถูกทำให้คงที่ที่ 300 มิลลิเมตร ส่วนความยาวของ

เตาจะถูกปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 2000 - 4800 มิลลิเมตร โดยผลของอัตราส่วน L/D เป็น 6.67 - 16 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.10 และตารางที่ 2.11

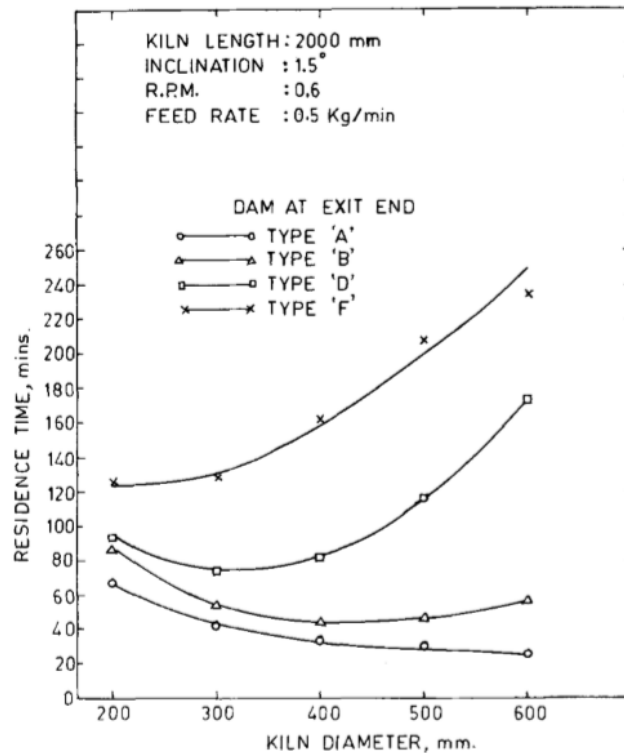
ตารางที่ 2.10 ผลของระยะเวลาในการดำเนินการและค่าการกอดตัวของวัสดุที่อัตราการป้อนและรูปแบบของจุดกั้นทางออกที่ต่างกัน ที่มุมโน้มเอียงเตา 1.5 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางเตา 300 มิลลิเมตร และความเร็วรอบในการหมุน 0.6 รอบต่อนาที

Feed rate (kg/min)	Volumetric feed rate (Pct of kiln volume per hour)	Type of kiln	Residence time (mins)	Kiln hold-up (kgs)	Back spillage (pct)	Volumetric kiln loading (pct)
0.25	4.295	A	57.75	13.5	-	3.87
		B	71.3	17.5	-	5.01
		D	122.5	37.0	-	10.60
		F	290.8	54.0	-	15.46
0.50	8.590	A	46.0	27.5	-	7.88
		B	55.0	31.0	-	8.88
		D	74.5	45.0	-	12.89
		F	127.0	73.0	-	20.91
0.75	12.885	A	43.6	33.0	-	9.45
		B	48.2	36.5	-	10.45
		D	67.8	8.5	2.3	16.75
		F	92.0	66.0	13.0	18.90
1.00	17.180	A	41.5	44.0	-	12.60
		B	43.6	49.0	-	14.03
		D	64.2	61.0	16.0	17.47
		F	83.0	78.0	29.0	22.34
1.25	21.475	A	39.5	47.0	7.0	13.46
		B	48.3	52.5	10.5	15.03
		D	65.2	64.0	20.0	18.33
		F	83.7	81.0	41.5	23.20

ตารางที่ 2.11 ผลของระยะเวลาในการดำเนินการและค่าการกอดตัวของวัสดุที่อัตราการป้อนและรูปแบบของจุดกั้นทางออกที่ต่างกัน ที่มุมโน้มเอียงเตา 1.5 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางเตา 500 มิลลิเมตร และความเร็วรอบในการหมุน 0.6 รอบต่อนาที

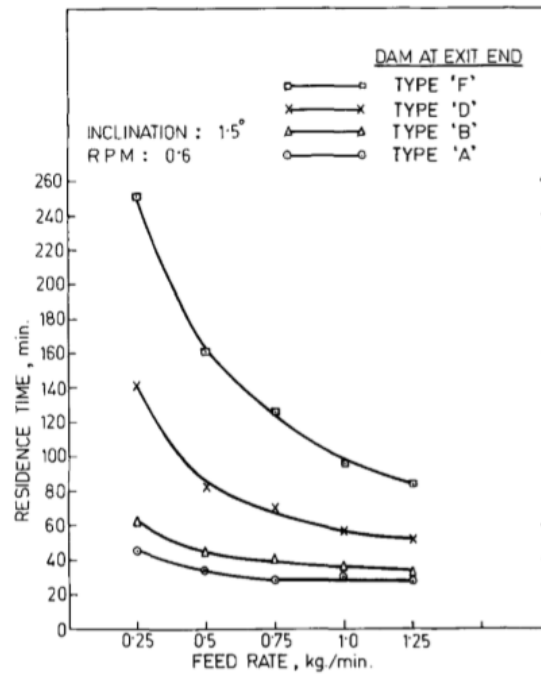
Feed rate (kg/min)	Volumetric feed rate (Pct of kiln volume per hour)	Type of kiln	Residence time (mins)	Kiln hold-up (kgs)	Back spillage (pct)	Volumetric kiln loading (pct)
0.25	1.546	A	37.0	7.0	-	0.72
		B	55.5	14.0	-	1.44
		D	184.0	53.5	-	5.52
		F	432.0	120.0	-	12.37
0.50	3.092	A	31.0	18.5	-	1.91
		B	47.0	21.5	-	2.22
		D	115.0	61.0	-	6.29
		F	228.0	124.0	-	12.37
0.75	4.638	A	29.5	22.0	-	2.27
		B	39.0	32.0	-	3.30
		D	90.0	66.0	-	6.80
		F	194.0	131.0	-	13.51
1.00	6.184	A	28.3	29.0	-	2.99
		B	35.0	37.0	-	3.81
		D	70.0	74.0	-	7.63
		F	142.0	139.0	-	14.33
1.25	7.730	A	26.5	33.0	-	3.40
		B	36.0	43.0	-	4.43
		D	60.5	82.0	-	8.45
		F	108.0	152.0	-	15.67

ในรูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเตากับระยะเวลาในการดำเนินการในรูปแบบของจุดกั้นทางออกที่ต่างกัน จากกราฟสังเกตได้ว่าที่จุดกั้นทางออกชนิด A (ไม่มีจุดกั้นทางออก) ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะเวลาในการดำเนินการลดลง



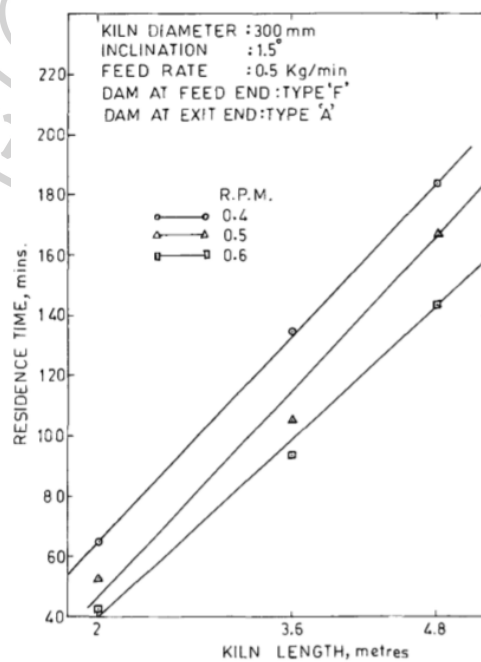
รูปที่ 2.25 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการที่รูปแบบจุดกั้นทางออกต่างๆ

ในรูปที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนกับระยะเวลาในการดำเนินการในรูปแบบของจุดกั้นทางออกที่ต่างกัน จากกราฟสังเกตได้ว่าที่จุดกั้นทางออกชนิด A (ไม่มีจุดกั้นทางออก) ถ้าอัตราการป้อนมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะเวลาในการดำเนินการลดลง แต่ลดลงในปริมาณที่น้อยมาก



รูปที่ 2.26 ผลของอัตราการป้อนที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการที่รูปแบบจุดกั้นทางออกต่างๆ

ในรูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเตากับระยะเวลาในการดำเนินการ ในรูปแบบของความเร็วรอบในการหมุนของเตาที่ต่างกัน จากกราฟสังเกตได้ว่าถ้าความยาวเตามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าระยะเวลาในการดำเนินการมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.27 ผลของความยาวเตาที่มีต่อระยะเวลาในการดำเนินการ

รูปแบบสมการ Chatterjee et al. (1983) ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการดำเนินการ (MRT) ประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) ความยาวของเตา (L) อัตราการป้อนเชิงปริมาตร (\dot{V}) มุมรีโพลของวัสดุ (θ) มุมโน้มเอียงของเตาเผา (β) และความเร็วรอบในการหมุนเตา (n) จัดเป็นความสัมพันธ์ในรูปเลขยกกำลังดังสมการต่อไปนี้

$$MRT = k(\theta)^a (L)^b (D)^c (\dot{V})^d (n)^e (\beta) \quad (2.10)$$

จัดในรูปของความสัมพันธ์พารามิเตอร์ไร้มิติได้รูปสมการเป็น

$$MRT = \frac{KL^3}{\dot{V}} \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^a \left(\frac{nL^3}{\dot{V}}\right)^e \left(\frac{L}{D}\right)^{-c} \quad (2.11)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่

โดยที่ ค่ายกกำลัง a, c และ e ได้มาจากการแก้สมการจากผลการทดลอง โดยการทดลองในส่วนแรกนั้น (การศึกษาผลของตัวแปรเงื่อนไขการทำงาน) จะสามารถหาตัวแปร a และ e ได้ดังสมการ

$$MRT = \frac{KL^3}{\dot{V}} \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^{1.504} \left(\frac{\dot{V}}{nL^3}\right)^{0.981} \quad (2.12)$$

ส่วนเทอมไร้มิติ L/D จะสามารถหาได้ในงานวิจัยส่วนที่ 2 โดยนำผลการทดลองมาสร้างเป็นกราฟ ล็อก-ล็อก และใช้วิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตัวแปร พบว่าค่ายกกำลัง c เป็น -1.1 และได้สมการสำหรับหาระยะเวลาในการดำเนินการเป็น

$$MRT = \frac{0.1026L^3}{\dot{V}} \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^{1.054} \left(\frac{\dot{V}}{nL^3}\right)^{0.981} \left(\frac{L}{D}\right)^{1.1} \quad (2.13)$$

2.13 สมการที่ใช้ในการหาระยะเวลาในการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

จากงานวิจัยเรื่อง Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns ของ Liu et al. (2006) ทำให้ทราบว่าสมการของ Sullivan et al. (1927) ได้กล่าวเกี่ยวกับสมการไว้ว่า ระยะเวลาการดำเนินการนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวซึ่งก็จะมีตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าแก้มที่มีค่าเท่ากับ

1.77 ความยาวของเตาเผาแบบหมุน (L) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (D) ความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผา (n) มุมเอียงของเตาเผาแบบหมุน (β) และ มุมรีโพสของวัสดุ (θ) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ มีผลกับระยะเวลาในการดำเนินการทั้งสิ้นทำให้ระยะเวลาในการดำเนินการมากหรือน้อยไม่เท่ากันซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [27, 32]

$$MRT = 1.77 \times \frac{L}{D} \times \frac{\sqrt{\theta}}{n \times \beta} \quad (2.14)$$

ดังนั้น ค่าระยะเวลาในการดำเนินการแปรผันตรงกับ ค่ามุมวัสดุที่ทำกับเตา (θ) และค่าของอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา (L/D) แต่แปรผกผันกับค่าความเร็วรอบในการหมุนของเตา (n) และค่ามุมเอียงของเตา (β)

และสมการของ Chatterjee et al. (1983) ก็ได้มีการพิสูจน์ในลักษณะที่คล้ายของ Sullivan et al., (1927) แต่มีจุดแตกต่างกันที่สมการของ Chatterjee et al. (1983) ได้มีการนำอัตราการป้อน (\dot{V}) มาใช้ในการคำนวณด้วยและค่าแก้และรูปแบบของสมการต่างกันอย่างเห็นได้ชัดดังสมการดังต่อไปนี้ [33, 34]

$$MRT = \frac{0.1026 \times L^3}{\dot{V}} \times \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^{1.054} \times \left(\frac{\dot{V}}{L^3 \cdot n}\right)^{0.981} \times \left(\frac{L}{D}\right)^{1.1} \quad (2.15)$$

และจากหนังสือ Rotary kilns transport phenomena and transport process ของ BOATENG. (2008) ได้ให้สมการสำหรับคำนวณระยะเวลาดำเนินการเฉลี่ยไว้ดังสมการต่อไปนี้ [5]

$$t = \frac{0.23L}{sN^{0.9}D} \pm 0.6 \frac{BLG}{F} \quad (2.16)$$

สมการของ Saeman. (1951) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ [35]

$$\frac{dh}{dx} = \frac{3 \times \tan \theta}{3 \times \pi \times n} \times \dot{V} \times [R_i^2 - (h - R_i^2)]^{-\frac{3}{2}} + \frac{dR_i}{dx} - \frac{\tan \beta}{\cos \theta} \quad (2.17)$$

โดย MRT คือ ระยะเวลาดำเนินการ (นาที)

- L คือ ความยาวของเตาเผาแบบหมุน (เมตร)
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาแบบหมุน (เมตร)
- θ คือ มุมที่วัสดุกระทำกับเตาเผาแบบหมุน (องศา)
- n คือ ความเร็วรอบในการหมุนเตาเผาแบบหมุน (รอบต่อนาที)
- β คือ มุมเอียงของเตาเผาแบบหมุน (องศา)
- \dot{V} คือ อัตราการป้อนเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)
- S คือ มุมเอียงของเตาเผา (ฟุต/ฟุต)
- N คือ ความเร็วรอบในการหมุนเตาเผาแบบหมุน (รอบต่อนาที)
- B คือ ค่าที่ขึ้นกับวัสดุโดยคำนวณจาก $B = 5(D_p)^{-0.5}$
- D_p คือ ขนาดของวัสดุ (ไมโครเมตร)
- G คือ อัตราการไหลของอากาศ (ปอนด์/ชั่วโมง ตารางฟุต)
- F คือ อัตราการป้อน (ปอนด์/ชั่วโมง ตารางฟุต)

ตารางที่ 2.12 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมการ

ตัวแปร	สมการ			
	Sullivan et al., (1927)	Chatterjee et al. (1983)	Friedman	Saeman (1951)
L	✓	✓	✓	-
D	✓	✓	✓	-
θ	✓	✓	-	✓
n	✓	✓	-	✓
β	✓	✓	-	✓
\dot{v}	-	✓	-	✓
S	-	-	✓	-
N	-	-	✓	-
B	-	-	✓	-
G	-	-	✓	-
F	-	-	✓	-
h	-	-	-	✓
R_f	-	-	-	✓

จากตารางพบว่า สมการทั้ง 4 สมการนั้นจะมีการใช้ตัวแปรในสมการที่แตกต่างกัน โดยในสมการของ Sullivan et al., (1927) นั้นจะประกอบด้วย ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง มุมของวัสดุ ความเร็วรอบ และ มุมเอียงของเตาเผาแบบหมุน โดยจะพบว่าในสมการของ Chatterjee et al. (1983) นั้นจะมีส่วนที่ต่างจากสมการของ Sullivan et al., (1927) คือ มีการนำอัตราการป้อนเชิงปริมาตรมาใช้ในสมการด้วย และในสมการของ Friedman (1949) นั้นจะพบว่า มีการนำค่าของของวัสดุมาใช้ในสมการด้วยและยังมีผลของอากาศภายในเตาที่เกี่ยวข้องกับสมการ และสุดท้ายในสมการของ Saeman (1951) พบว่า จะมีการนำค่าของ ความสูงของวัสดุภายในเตาเผามาใช้ในสมการ โดยจากทั้ง 4 สมการ พบว่า ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง มุมเอียงของเตาเผา มุมของวัสดุภายในเตาเผา และความเร็วยรอบการหมุนของเตาเผา เป็นตัวแปรสำคัญของสมการ

จากการศึกษาสมการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพบว่าสมการจะมีตัวแปรที่คล้ายกัน คือ พบว่า ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง มุมเอียงของเตาเผา มุมของวัสดุภายในเตาเผา และความเร็วยรอบการหมุนของเตาเผา จะเป็นตัวแปรหลักในทุกสมการ ซึ่งจะพบว่าจะมีสมการที่มีค่าของอัตราการป้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ยังไม่มีการไหนที่กล่าวถึงจำนวนของใบกวนที่มีในสมการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะทำการสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั่น โดยในการสร้างสมการนั้นจะนำผลของทุกตัวแปรมาใช้ในการสร้างสมการ ได้แก่ ความยาวเตาเผา เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา มุมเอียงของเตาเผา มุมรีโพลของวัสดุภายในเตาเผา ความเร็วยรอบการหมุนของเตาเผา อัตราการป้อนเชิงปริมาตร และจำนวนใบกวนภายในเตาเผา



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาผลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อคุณสมบัติของชีวมวล หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุน ความเร็วรอบการหมุนเตาเผา มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน และจำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุนที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินงานของเตาเผาแบบหมุน และนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

ในการวิจัยและการทดลองมีอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งออกเป็น อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล

3.1.1.1 เครื่องสับหยาบ

เครื่องสับหยาบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดขนาดของชีวมวลให้มีขนาดเล็กกลง โดยการใส่เข้าไปในเครื่องสับหยาบที่จะมีอุปกรณ์บด และ สับ ทำให้ชีวมวลที่ผ่านเครื่องสับหยาบมีขนาดเล็กกลงอยู่ที่ขนาดในช่วง 1 – 5 เซนติเมตร โดยเครื่องสับหยาบมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งเครื่องสับหยาบจะแสดงอยู่ดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องสับหยาบ

3.1.1.2 เครื่องสับละเอียด

เครื่องสับละเอียดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวลโดยข้างในเครื่องจะมีใบตัดสำหรับย่อยชีวมวลจนมีขนาดเล็กจนสามารถผ่านรูตะแกรงที่ติดตั้งไว้ด้านในของเครื่องได้ โดยขนาดรูตะแกรงจะมีขนาดตั้งแต่ 2, 5 และ 9 มิลลิเมตร โดยเครื่องสับละเอียดมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมงซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องสับละเอียด

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เต้าเผาแบบ fix bed สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 3.3 แสดงถึงเต้าเผาแบบ fix bed สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นโดยให้ความร้อนจากขอลวดความร้อนขนาด 2 กิโลวัตต์



รูปที่ 3.3 เต้าเผาแบบ fix bed สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

3.1.2.2 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น



รูปที่ 3.4 เตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ส่วนประกอบของเตาเผาแบบหมุน

1. ฮอปเปอร์: เป็นส่วนที่บรรจุชีวมวลดิบเพื่อป้อนเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน โดยฮอปเปอร์มีขนาดเท่ากับ 0.7x0.7x0.8 เมตร ข้างในมีเกลียวลำเลียงขนาด 3 นิ้ว ยาว 0.7 เมตร เพื่อป้อนชีวมวลดิบเข้าสู่ภายในเตาเผาแบบหมุน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า โดยส่งกำลังผ่านชุดโซ่และเฟือง
2. ส่วนกักเก็บความร้อน: ทำหน้าที่เป็นส่วนกักเก็บความร้อนของเตาเผาแบบหมุน โดยทำมาจากถัง 200 ลิตรต่อกันจำนวน 6 ถัง ความยาวรวม 5.2 เมตร ภายในหุ้มด้วยฉนวนเซรามิกไฟเบอร์เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนออกไปที่ผิวของถัง 200 ลิตร ภายในมีล้อขนาด 3 นิ้ว เพื่อรองรับท่อ 12 นิ้วภายในเตาเผาแบบหมุน
3. ไฮโดรลิก: เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการช่วยในการปรับมุมของเตาเผาแบบหมุนตั้งแต่ 1-5 องศา โดยใช้ไฮโดรลิกขนาด 10 ตัน

4. ฐานรองรับส่วนกักเก็บความร้อน: เป็นฐานรองรับส่วนกักเก็บความร้อนรวมถึงส่วนของห้องเผาไหม้ที่เป็นส่วนให้ความร้อน สามารถปรับมุมเอียงได้ 0 – 5 องศา ขนาดความกว้าง 0.81 เมตร ยาว 6.0 เมตร และสูง 0.4 เมตร ทำมาจากเหล็กกล่องขนาด 2x2 นิ้ว

5. โครงสร้างฐาน: ส่วนรองรับทั้งหมดของเตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชันชนิดโรตารี ขนาดกว้าง 0.9 เมตร ยาว 6.0 เมตร และสูง 1.3 เมตร ทำมาจากเหล็กกล่องขนาด 2x2 นิ้ว

6. ห้องเผาไหม้: เป็นส่วนที่ป้อนชีวมวลอัดก้อนหรือเชื้อเพลิง LPG เพื่อเป็นแหล่งความร้อนของเตาเผาแบบหมุน มีขนาดกว้าง 0.55 เมตร ยาว 0.8 เมตร และสูง 1.3 เมตร มีท่อขนาด 4 นิ้ว จำนวน 6 ท่อเป็นส่วนป้อนชีวมวลอัดก้อน หรือเปลี่ยนเป็นหัวเตาแก๊สเพื่อใช้กับเชื้อเพลิง LPG ด้านตรงข้ามมีถาดเก็บขี้เถ้า เพื่อเก็บขี้เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดก้อน

7. ระบบขับเคลื่อน: ประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ชุดเกียร์ทดรอบอัตราทด 1:60 และเฟืองตรงขนาด 1.5 และ 6 นิ้ว เฟืองโซขนาด 7 นิ้ว เป็นตัวส่งกำลังไปยังโซที่ล้อมรอบเตาเผา (ท่อ 12 นิ้ว)

3.1.2.2 เครื่องทำน้ำเย็น

เครื่องทำน้ำเย็น (Cold Bath eyela cool ace ca-1111) สามารถทำอุณหภูมิของเหลวได้ตั้งแต่ -20 ถึง 30 องศาเซลเซียส สามารถทำความเย็นขนาดใหญ่ 1200 วัตต์ ที่อุณหภูมิของเหลว 10 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 เครื่องทำน้ำเย็น (Cold Bath eyela cool ace ca-1111)

3.1.2.3 เครื่องควบแน่น

เครื่องควบแน่น เป็นส่วนควบแน่นแก๊สไอเสียจากเครื่องปฏิกรณ์ ภายในมีชุดท่อทองแดงเป็นตัวผ่านของแก๊สไอเสีย ให้แก๊สควบแน่นกลายเป็นของเหลว เพื่อลดการปล่อยแก๊สไอเสีย



รูปที่ 3.6 เครื่องควบแน่น

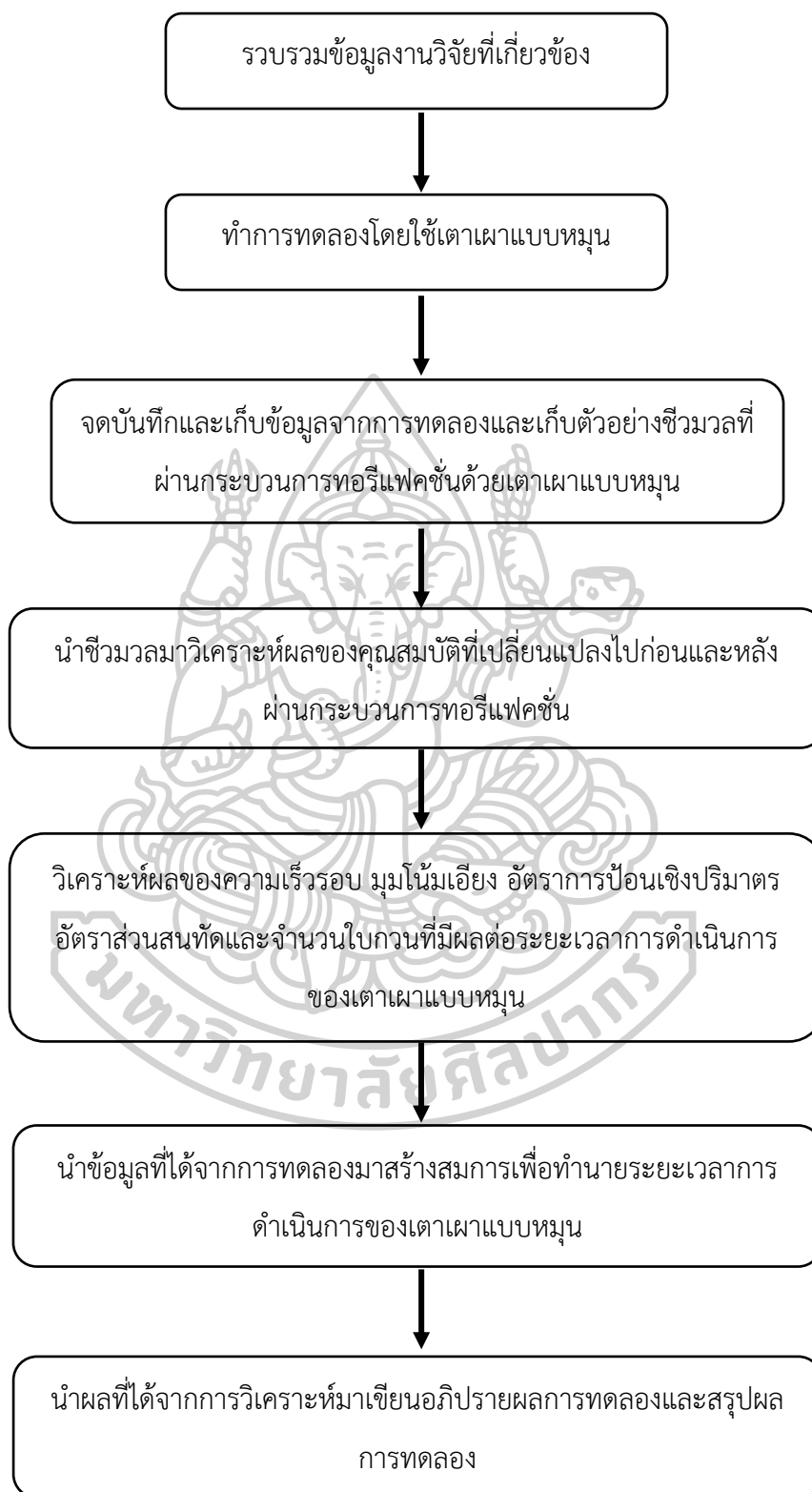
3.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมเชื้อเพลิงและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

3.3 การวางแผนงานวิจัย

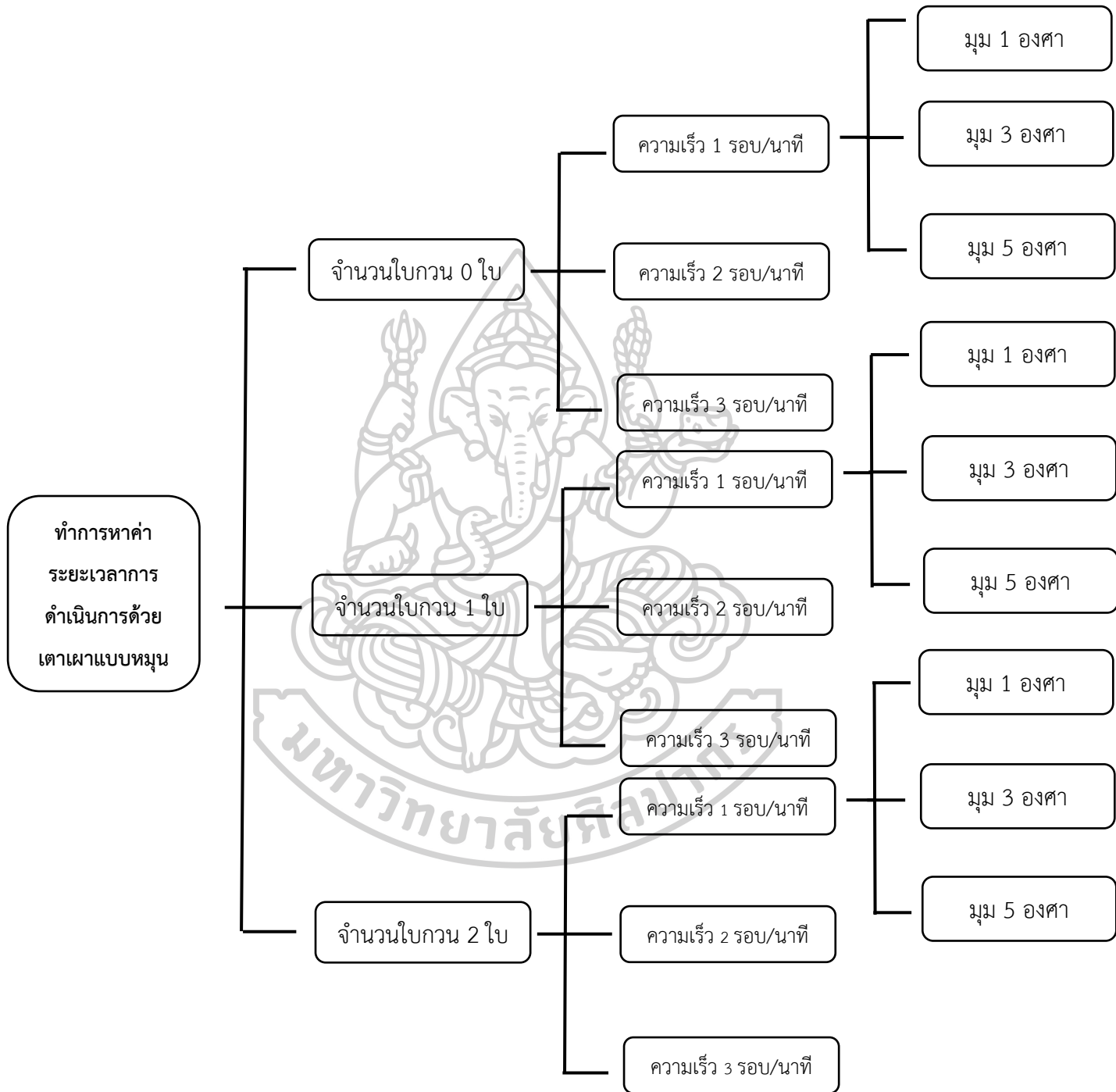
3.3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานในการศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเตาเผาชีวมวลแบบหมุนในส่วนของคุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุน ผลของความเร็วยรอบ มุมโน้มเอียง และจำนวนของใบกวนภายในเตาเผาที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินงานของเตาเผาแบบหมุน หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน ซึ่งแสดงดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงแผนการวิจัยการสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

3.3.2 แผนการทดลอง



รูปที่ 3.8 แผนการทดลองการสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

ตารางที่ 3.1 จำนวนการทดลอง

ชนิดชีวมวล	จำนวน ไบอวาม (รูปแบบ)	มุมโน้ม เอียง (องศา)	ความเร็วรอบใน การหมุนเตาเผา (รอบต่อนาที)	อัตราการป้อน (ลูกบาศก์ เมตรต่อนาที)	อัตราส่วน สดตัด	จำนวน ซ้ำ	จำนวนการ ทดลอง
กะลาปาล์ม	3	3	3	3	3	3	729
ซังข้าวโพด	3	3	3	-		3	81
กระถิน	3	3	3	-		3	81
แกลบ	3	3	3	-		3	81
จำนวนการทดลองทั้งหมด							972

จากตารางที่ 3.1 จะแสดงจำนวนของการทดลองทั้งหมด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากะลาปาล์มจะมีการทดลองทั้งหมด 729 การทดลอง และซังข้าวโพด กระถิน และ แกลบ จะมีการทดลองทั้งหมด 81 การทดลอง ดังนั้นในการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้จะมีการทดลองทั้งหมดรวมเป็น 972 การทดลอง

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

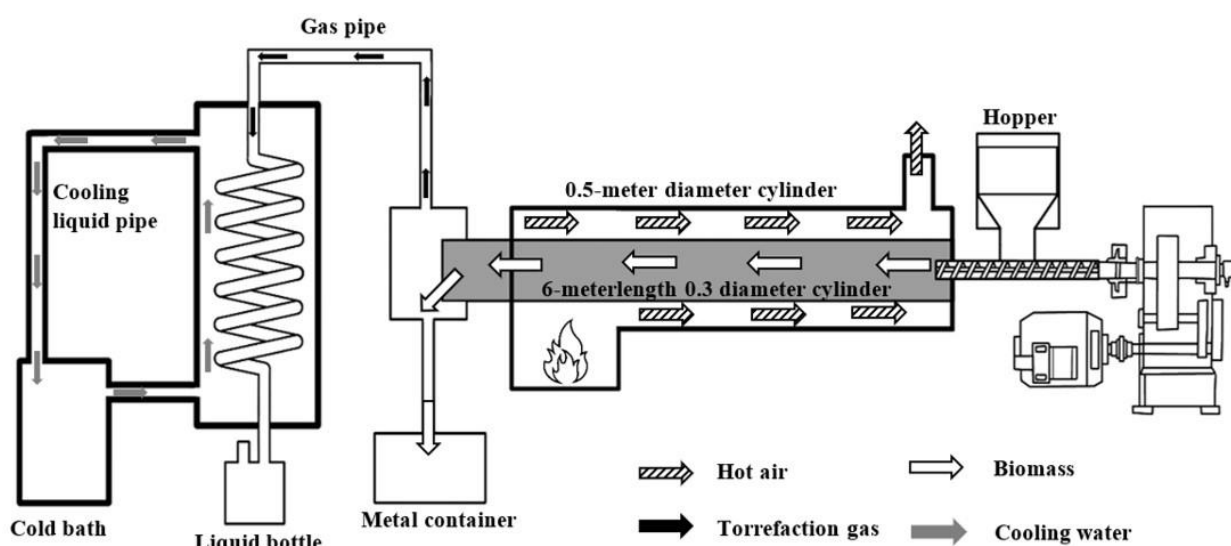
3.4.1 กระบวนการทอรีแฟคชั่นและ

นำชีวมวลที่ผ่านการสับละเอียดที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ใส่ไว้ในฮอปเปอร์เพื่อเตรียมสำหรับป้อนเข้าสู่เตาเผา จากนั้นเปิดระบบควบคุมเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น และทำการให้ความร้อนโดยใช้แก๊สปิโตเลียมเหลว เมื่ออุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (230, 250 และ 270) องศาเซลเซียส เริ่มทำการป้อนชีวมวลสับละเอียดเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน ชีวมวลจะไหลไปตามท่อของเตาเผาแบบหมุน เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่น ชีวมวลจะไหลเข้าสู่ถังเก็บชีวมวล เมื่อชีวมวลทั้งหมดไหลออกจากเตาเผาแบบหมุน จะถือว่าเสร็จสิ้นการทดลอง เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองทำการเก็บชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

3.4.2 การควบแน่นแก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น

นำชีวมวลที่ผ่านการสับละเอียดที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ใส่เข้าสู่เตาทอรีแฟคชั่นแบบ fix bed ต่อเครื่องควบแน่นเข้ากับปล่องทางออกของเตาทอรีแฟคชั่นเพื่อให้แก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่น จากนั้นเปิดเครื่องทำความเย็นเพื่อทำน้ำหล่อ โดยตั้งค่าน้ำเย็นให้ไปอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเปิดเตาทอรีแฟคชั่นโดยใช้อุณหภูมิ 230

250 และ 270 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการดำเนินการ 1 ชั่วโมง โดยมีค่าอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที แก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชันจะไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่นเพื่อควบแน่นกลายเป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองทำการเก็บของเหลวที่ได้จากการควบแน่นเพื่อนำไปวิเคราะห์ส่วนประกอบ

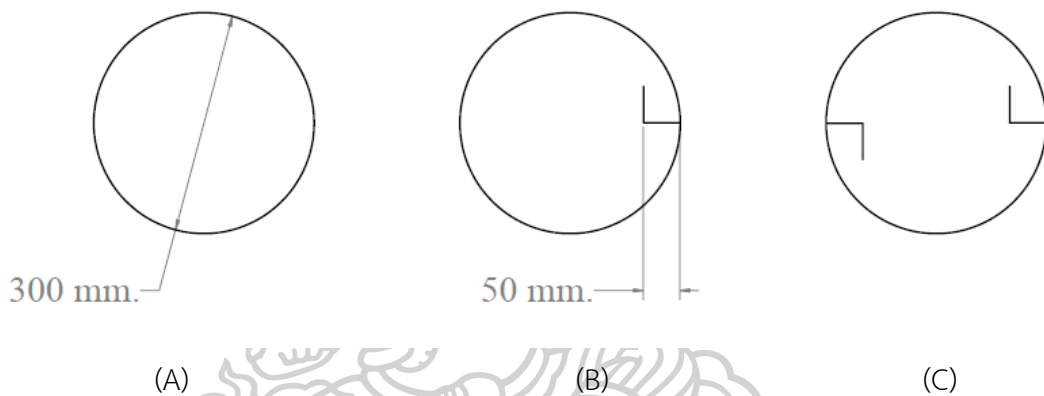


รูปที่ 3.9 กระบวนการทอรีแฟคชันและการควบแน่นแก๊สจากกระบวนการทอรีแฟคชัน

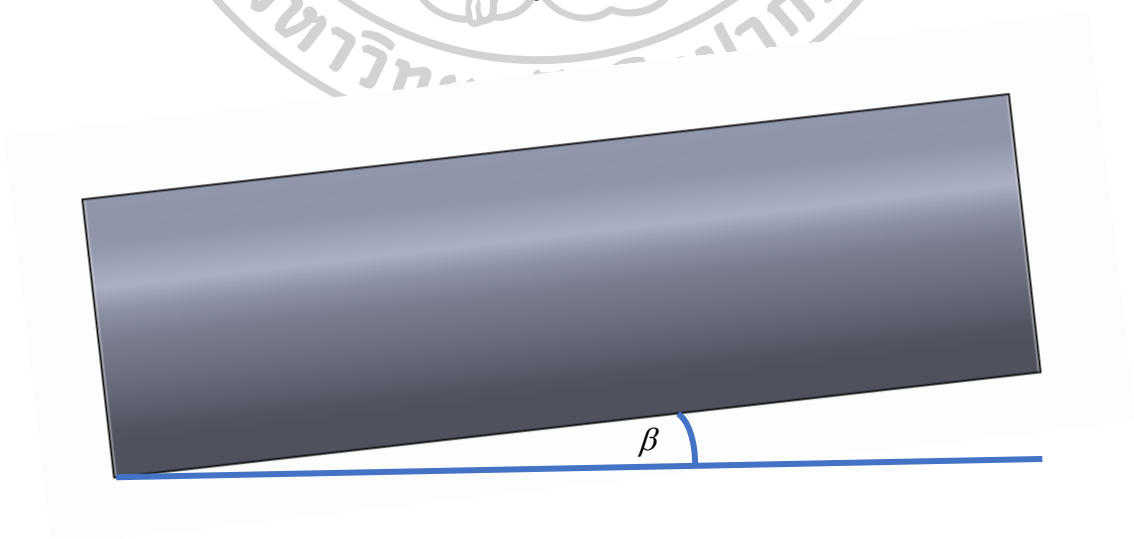
3.4.3 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน

ในการทดลองทั้งหมดนั้นจะใช้จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุนจำนวน 3 ค่า (0 1 และ 2 ใบ) ความเร็วรอบจำนวน 3 ค่า (1 2 และ 3 รอบต่อนาที) มุมโน้มเอียงทั้งหมด 3 ค่า (1 3 และ 5 องศา) โดยวิธีการทดลองสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ เตรียมชีวมวลดิบเพื่อนำมาป้อนเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน โดยนำมาผ่านอุปกรณ์สับหยาบ และ สับละเอียดเพื่อลดขนาดของชีวมวลลงให้มีขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาตากเพื่อลดความชื้น โดยในการทดลองจะควบคุมความชื้นของชีวมวลให้ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ติดตั้งใบกวนเข้าในเตาเผาแบบหมุนโดยใช้ใบกวนรูปตัว L ขนาด 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10 หลังจากนั้นนำชีวมวลที่ใช้ในการทดลองใส่ไว้ในฮอปเปอร์เพื่อเตรียมป้อนเข้าสู่เตาเผาแบบหมุน ตั้งค่าความเร็วรอบการหมุนของเตาโดยการปรับค่าความถี่ที่อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายไฟเข้าสู่มอเตอร์ โดยเตาเผาแบบหมุนจะหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาและปรับมุมโน้มเอียง โดยมุมโน้มเอียงของเตาเผาจะแสดงดังในรูปที่ 3.11 จากนั้นเริ่มเดินเครื่องเตาเผาแบบหมุนและป้อนชีวมวลจากฮอปเปอร์เข้าสู่เตาเผาแบบหมุน และเริ่มจับเวลา จากนั้นตั้งกล้องอัตโนมัติเพื่อเก็บวิดีโอขณะที่ชีวมวลไหลออกจากเตาเผาแบบหมุนเพื่อนำมาหาค่ามูเมรีโพล โดยจะใช้วิธีการบันทึกเป็นวิดีโอที่บริเวณปลาย

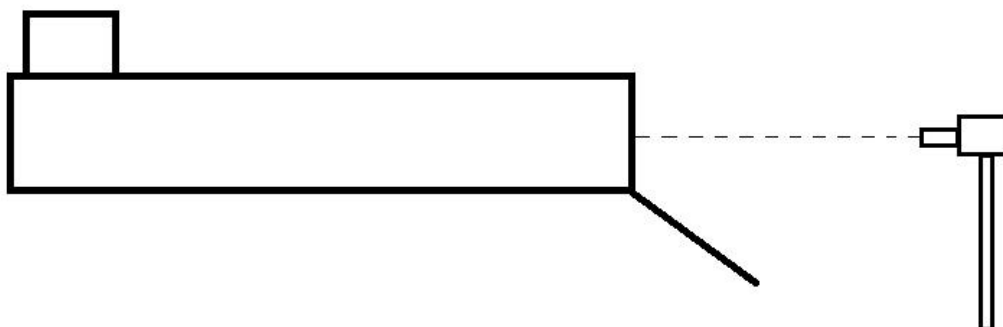
ทางออกของเตาขณะที่มีชีวมวลตกลงสู่ถังบรรจุ โดยตำแหน่งการวางกลิ้งจะอยู่ตรงกลางบริเวณปลายทางออกของเตา เพื่อที่จะง่ายต่อการวัดมุม โดยจะแสดงดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 เมื่อชีวมวลกลุ่มแรกออกมาให้ทำการหยุดเวลาโดยจะหยุดเวลาเมื่อชีวมวลกลุ่มแรกที่ออกมานั้นมีการไหลแบบต่อเนื่อง และบันทึกค่าของเวลา จำนวนใบกวน มุมโน้มเอียง และความเร็วรอบ หลังจากนั้นให้หยุดระบบป้อนชีวมวลที่ฮอปเปอร์ และรอจนชีวมวลไหลออกจากเตาหมด ถึงเริ่มทำการทดลองอีกครั้ง หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์และสร้างสมการเพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนต่อไป



รูปที่ 3.10 ลักษณะการติดตั้งใบกวนในเตาเผาแบบหมุน
 (A) เตาเผาแบบไม่ติดตั้งใบกวน (B) ติดตั้งใบกวนรูปตัว L จำนวนหนึ่งใบกวน
 (C) ติดตั้งใบกวนรูปตัว L จำนวนสองใบกวน



รูปที่ 3.11 มุมของเตาเผาแบบหมุน



รูปที่ 3.12 การตั้งกล้องวิดีโอเพื่อบันทึกมุมรีโพลของวัสดุในเตาเผาแบบหมุน



รูปที่ 3.13 การหาค่ามุมรีโพลของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุน

3.5 การบันทึกและวัดค่ามุมรีโพล (Angle of repose)

ค่ามุมรีโพลของวัสดุ (θ) เป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในสมการคำนวณระยะเวลาในการดำเนินการสมการที่ถูกระบุขึ้น โดยวิธีการเก็บค่ามุมรีโพลของวัสดุ จะใช้วิธีการบันทึกเป็นวิดีโอที่บริเวณปลายทางออกของเตาขณะที่มีชีวมวลตกลงสู่ถังบรรจุ โดยตำแหน่งการวางกล้องจะอยู่ตรงกลางบริเวณปลายทางออกของเตา เพื่อที่จะง่ายต่อการวัดมุมตามรูปที่ 3.11 เมื่อบันทึกวิดีโอเสร็จแล้วจะนำวิดีโอมาเลือกช่วงที่เห็นมุมรีโพลของวัสดุและทำให้เป็นภาพนิ่ง นำภาพมาวัดเพื่อหามุมรีโพลของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 3.13

3.6 การหาพื้นที่หน้าตัดของวัสดุบนใบกววน

ค่าของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุบนใบกววน ($S_{horlift}$) เป็นหนึ่งในตัวแปรที่นำมาใช้ในการคำนวณระยะเวลาการดำเนินการที่สร้างขึ้น โดยจะนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ภายในเตาเผาที่ไม่รวมพื้นที่วัสดุบนใบกววน (S_{lift}) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ [21, 36]

พื้นที่ภายในเตาเผาแบบหมุนโดยไม่รวมพื้นที่วัสดุบนใบกววน

$$S_{lift} = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{n_{lift} - 1}{2} S_{horlift} \quad (3.1)$$

พื้นที่หน้าตัดของวัสดุบนใบกววน

$$S_{lift} = A_w - A_{11} - A_{12} \quad (3.2)$$

$$A_w (\triangle OAE) = (\gamma + \varepsilon^* - \varphi) \frac{\pi R^2}{2\pi} \quad (3.3)$$

$$A_{11} (\triangle FDC) = \frac{1}{2} \cdot l_2^2 \tan(\varphi - \gamma) \quad (3.4)$$

$$A_{12} (\triangle OAF) = \frac{Rr_{HS} \cos(\kappa - \gamma) \sin(\gamma + \varepsilon^* - \varphi)}{2 \cos(\varphi - \gamma)} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon^* = \arccos \left[\left(\frac{r_H}{R} \right) \frac{\cos(\kappa - \gamma)}{\cos \alpha} \right] \quad (3.6)$$

$$\kappa = \frac{\pi}{2} + \delta \quad (3.7)$$

$$\varphi = \kappa - \alpha \quad (3.8)$$

โดย S_{lift} คือ พื้นที่ภายในเตาเผาแบบหมุนโดยไม่รวมพื้นที่วัสดุบนใบกววน (m^2)

N_{lift} คือ จำนวนใบกววนภายในเตาเผาแบบหมุน

$S_{horlift}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุบนใบกววน (m^2)

A_w คือ พื้นที่มุมสามเหลี่ยม OAE (m^2)

A_{11} คือ พื้นที่มุมสามเหลี่ยม FDC (m^2)

A_{12} คือ พื้นที่มุมสามเหลี่ยม OAF (m^2)

γ คือ dynamic angle of repose (rad)

ε^* คือ auxiliary filling angle (rad)

φ คือ auxiliary coordinate (rad)

R คือ รัศมีของเตาเผาแบบหมุน (m)

l_2 คือ ความกว้างของใบกวน (m)

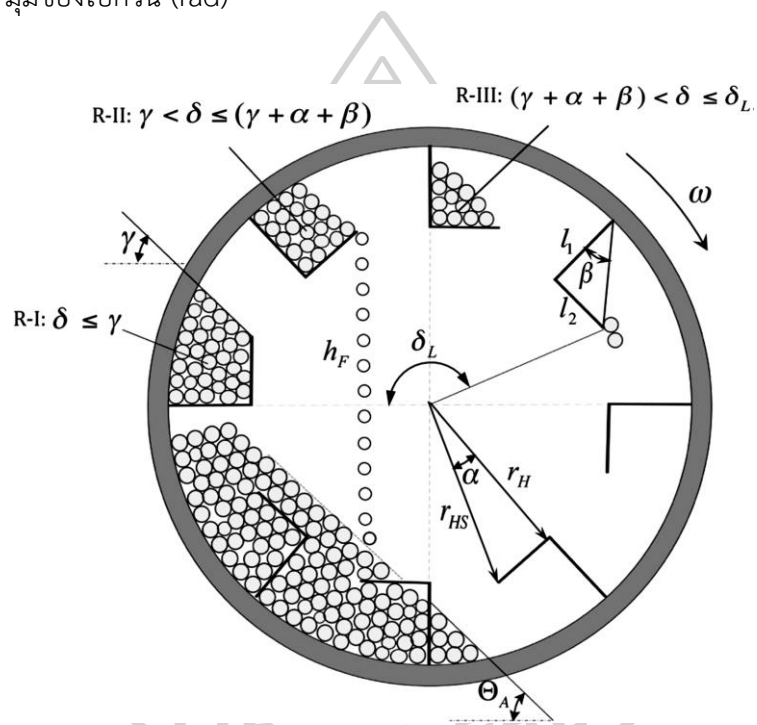
r_{HS} คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางเตาเผาแบบหมุนถึงปลายของใบกวน (m)

r_H คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางเตาเผาแบบหมุนถึงใบกวน (m)

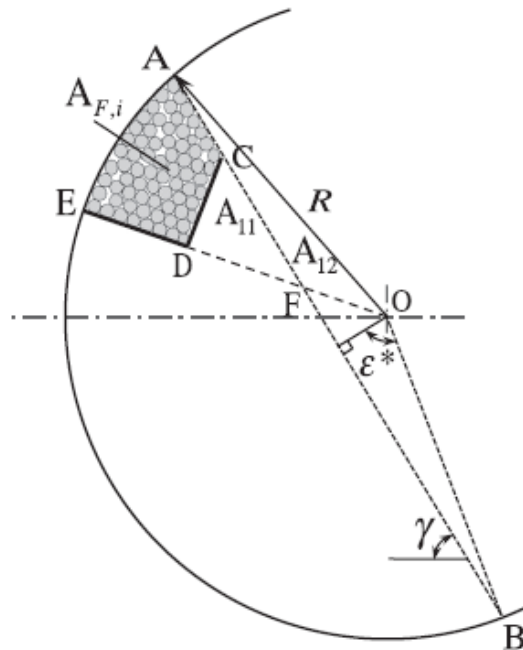
κ คือ auxiliary coordinate (rad)

δ คือ มุมที่วัสดุเริ่มตกลงจากใบกวนโดยจะมีค่าเท่ากับมุมรีโพสของวัสดุ (rad)

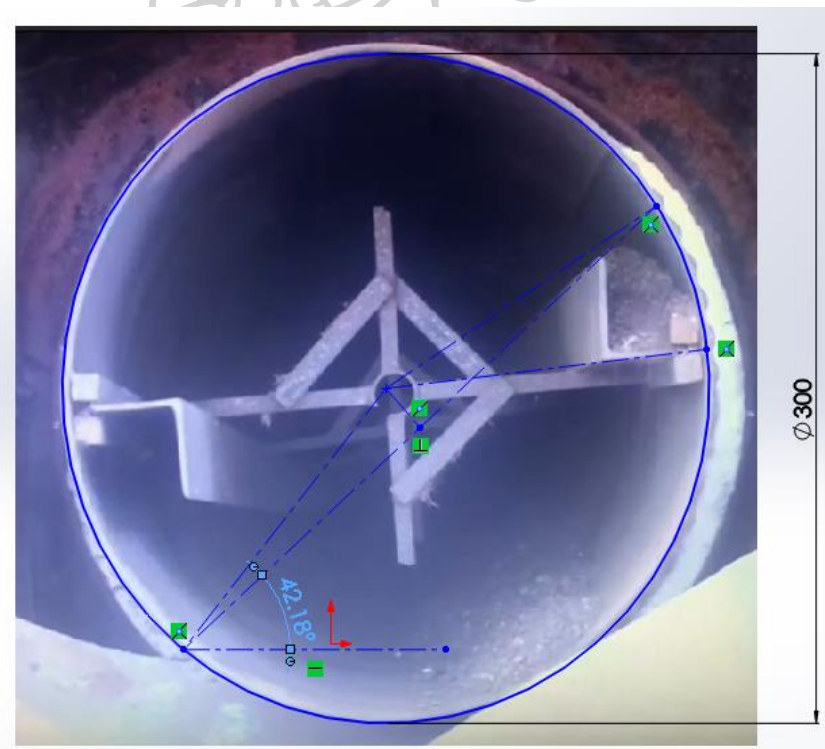
α คือ มุมของใบกวน (rad)



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงตัวแปรต่างๆภายในเตาเผาแบบหมุนและคุณลักษณะของการตกของวัสดุในเตาเผาแบบหมุน



รูปที่ 3.15 ภาพตัดขวางของเตาเผาแบบหมุนเพื่อแสดงวัสดุบนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุนที่ R-1



รูปที่ 3.16 การหาค่า dynamic angle of repose ด้วยโปรแกรม Solidworks

3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันได้แก่ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ การกระจายตัวของขนาดอนุภาค ผลได้เชิงมวล ผลได้เชิงพลังงาน และวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการ ได้แก่ ความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุน มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน อัตราการป้อนเชิงปริมาตร อัตราส่วนสกัดจำนวนใบกวนของเตาเผาแบบหมุน

3.7.1 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยใช้เตาทอรีแฟคชันแบบ fixed bed ขนาดเล็ก โดยให้ความร้อนจากขดลวดความร้อนขนาด 2 กิโลวัตต์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส ที่ทางออกจากเตาเผาจะต่อเข้ากับชุดควบแน่นเพื่อควบแน่นแก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยในการทดลองจะเก็บน้ำหนักของชีวมวลก่อนการทดลอง น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้มาคำนวณเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ จากนั้นจะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ของแก๊สได้จากสมการ

$$100 = Y_{\text{solid}} + Y_{\text{liquid}} + Y_{\text{gas}} \quad (3.9)$$

$$Y_{\text{solid}} = m_{\text{solid}} / m_{\text{total}} \quad (3.10)$$

$$Y_{\text{liquid}} = m_{\text{liquid}} / m_{\text{total}} \quad (3.11)$$

เมื่อ Y_{solid} คือ ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (%)

Y_{liquid} คือ ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (%)

Y_{gas} คือ ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแก๊สหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (%)

m_{solid} คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (kg)

m_{liquid} คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (kg)

m_{total} คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (kg)

3.7.2 การวิเคราะห์ผลของลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์จะเป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพที่สามารถสังเกตได้ คือ ขนาดของชีวมวล และสีของชีวมวล

3.7.3 การวิเคราะห์ผลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุนที่มีต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นเทียบกับก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น เพื่ออธิบายว่าที่อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการสลายตัวของชีวมวลในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่น และอธิบายผลของระยะเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ส่งผลต่อการสลายตัวของชีวมวล โดยค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสามารถคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D422 โดยใช้ขนาดตะแกรงทั้งหมด 12 ขนาด สามารถคำนวณการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้จากสมการ

$$\text{Sieve (\%)} = (S/W_t) \times 100\% \quad (3.12)$$

เมื่อ S คือ น้ำหนักของชีวมวลที่อยู่บนชั้นตะแกรงแต่ละช่วงขนาด (g)

W_t คือ น้ำหนักรวมทั้งหมดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (g)

3.7.4 การวิเคราะห์ผลของค่าความร้อนของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุนที่มีต่อค่าความร้อนของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยค่าความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

ค่าความร้อนของการเผาไหม้

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (3.13)$$

เมื่อ H_g คือ ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้ (จุลต่อกรัม)

W คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)

m คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)

- e_1 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ HNO_3 (23.9 แคลอรี)
 e_2 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ H_2SO_4 (13.7 แคลอรี)
 e_3 คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้

Parr 45C10 สายฟิวนิกเกิลโครม)

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (3.14)$$

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

ค่ามาตรฐานแคลอริมิเตอร์

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_3}{t} \quad (3.15)$$

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

Parr 45C10 สายฟิวนิกเกิลโครม)

3.7.5 การวิเคราะห์ผลของค่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุนที่มีต่อค่าผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยผลได้เชิงมวลจะแสดงถึงสัดส่วนของมวลที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นเทียบกับมวลเริ่มต้น เพื่อบ่งบอกถึงการสลายตัวของชีวมวลในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่น และผลได้เชิงพลังงานจะแสดงถึงร้อยละของผลผลิตเชิงพลังงานของชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นเทียบกับชีวมวลดิบ โดยผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานสามารถคำนวณได้จาก

$$Y_m = (M_t / M_r) \times 100 \% \quad (3.16)$$

$$Y_e = Y_m \times (HHV_t / HHV_r) \quad (3.17)$$

โดย Y_m คือ ผลได้เชิงมวล (%)

Y_e คือ ผลได้เชิงพลังงาน (%)

M_t คือ มวลของชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (kg)

M_r คือ มวลของชีวมวลดิบก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (kg)

HHV_t คือ ค่าความร้อนของชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (MJ/kg)

HHV_r คือ ค่าความร้อนของชีวมวลดิบก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (MJ/kg)

3.7.6 การวิเคราะห์ผลของตัวแปรในการดำเนินงานที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ผลของตัวแปรในการดำเนินงานได้แก่ ความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุน มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาแบบหมุน และอัตราการป้อนเชิงปริมาตร เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการ และแนวโน้มของระยะเวลาการดำเนินการ โดยทำการศึกษาโดยใช้ชีวมวลทั้งหมด 4 ชนิด ความเร็วรอบการหมุน 3 ค่า มุมโน้มเอียง 3 ค่า อัตราการป้อนเชิงปริมาตร 3 ค่า จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน 3 ค่า และค่าอัตราส่วนสนทัด 3 ค่า โดยในการทดลองค่าอัตราการป้อนเชิงปริมาตรและค่าอัตราส่วนสนทัด จะทำการทดลองกับชีวมวลกะลาปาล์นิตเดียว เนื่องจากต้องการให้มีข้อมูลการทดลองให้ครอบคลุมในส่วนของตัวแปรที่กล่าวมา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟเพื่อดูแนวโน้มของตัวแปรที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

3.7.7 การวิเคราะห์การสร้างสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของ เตาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยทำการสร้างสมการของตัวแปรไร้มิติจากทฤษฎี Buckingham-π จากนั้นใช้วิธีกำลังสองถดถอยน้อยสุดเพื่อหาค่าคงที่ของสมการ จากนั้นนำค่าระยะเวลาการดำเนินการที่ได้จากการทดลองและจากสมการสหสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมาเปรียบเทียบกับเพื่อดูค่าความคลาดเคลื่อน และนำค่าจากข้อมูลที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้ามาใช้ในสมการสหสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นเพื่อดูค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น



บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเตาเผาแบบหมุน, ผลของตัวแปรที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินงานของเตาเผาแบบหมุน และการสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

4.1 คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเตาเผาแบบหมุน

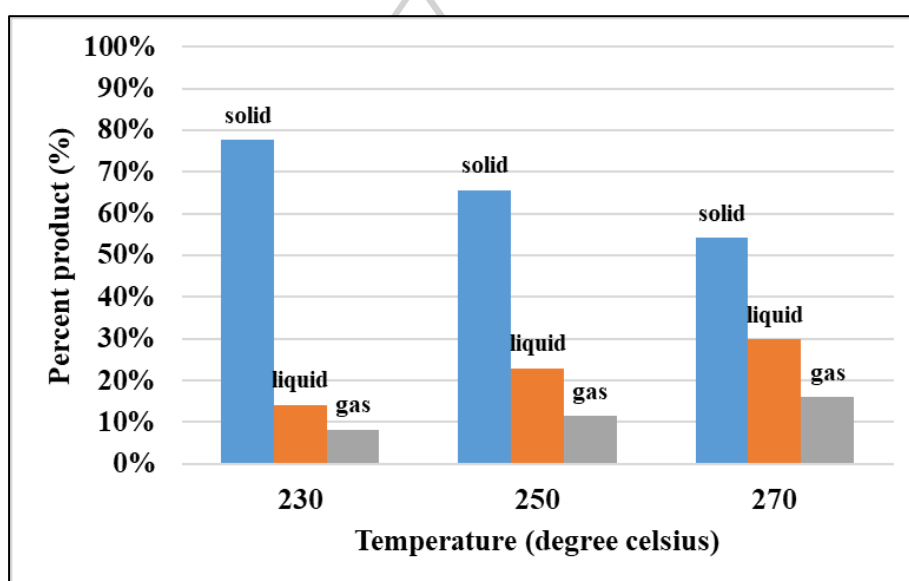
4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยจะแสดงถึงอัตราส่วนของชีวมวลที่ถูกทอรีไฟร์ ของเหลวที่ได้จากการควบแน่น และแก๊ส โดยใช้เตาทอรีแฟคชันชนิด fixed bed ในการทดลอง จากการทดลองสามารถหาปริมาณของแก๊สที่ได้จากการทดลองจากสมการสมดุลมวล โดยกำหนดให้ชีวมวลดิบก่อนกระบวนการทอรีแฟคชันมีค่าเท่ากับ 100 เปอเซ็นต์ ซึ่งเป็นผลรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันทั้งหมด 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส จากการทดลองจะสามารถทราบมวลของของแข็งและของเหลวจากการทดลองได้ ดังนั้นจากสมการสมดุลมวลจะทำให้ทราบถึงเปอเซ็นต์ของแก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายตัวของปริมาณผลิตภัณฑ์จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 จากการทดลองพบว่าโดยจากรูปจะเห็นว่า แนวนอนของผลิตภัณฑ์ของแข็งจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการสลายตัวของสารประกอบภายในชีวมวล ความชื้น หรือ สารระเหยที่อยู่ภายใน [13, 37, 38] ซึ่งอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ปริมาณชีวมวลทอรีไฟร์ลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เฮมิเซลลูโลส ซึ่งสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 220 - 300 องศาเซลเซียส และสลายตัวมากที่สุดที่ 300 องศาเซลเซียส เซลลูโลส สลายที่ช่วง 270 - 300 องศาเซลเซียส และลิกนิน สลายที่ช่วง 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทำให้ลิกนินสลายตัวยากที่สุด นั่นหมายความว่า ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันที่ 270 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของ เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นปริมาณมาก เมื่อเทียบกับอีก 2 อุณหภูมิ ซึ่งจากการสลายตัวของสารประกอบภายในชีวมวลที่เกิดขึ้นส่งผลให้ปริมาณของแก๊ส และ ของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ chen et al. (2018) และงานวิจัยของ Zhanga et al. (2018) ที่ใช้เตาเผาชนิด fixed bed ในกระบวนการทอรีแฟคชัน มีแนวโน้มและผลการทดลองไป

ในทางเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น แก๊สที่ควบแน่นเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้นเช่นกัน [13, 39]

ตารางที่ 4.1 ผลได้ของผลิตภัณฑ์หลังจากกระบวนการทอรีแฟคชัน

temperature (degree Celsius)	yield (%)		
	Solid phase (bio-coal)	Liquid phase	Gas phase (non-condensable gas)
230	77.60	14.20	8.20
250	65.67	22.93	11.40
270	54.10	29.87	16.03



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน

4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลหลังจากกระบวนการทอรีแฟคชัน

รูปที่ 4.2 แสดงถึงชีวมวลก่อนและหลังจากกระบวนการทอรีแฟคชันโดยชีวมวลดิบกะลาปาล์มจะแสดงดังรูปที่ 4.2ก. โดยจะเห็นว่าชีวมวลดิบก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีขนาดใหญ่ และชีวมวลผลที่ได้ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230 250 และ 270 องศาเซลเซียส แสดงดังในรูปที่ 4.2ข 4.2ค และ 4.2ง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะมีขนาดเล็กกล่งเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และจะมีสีที่คล้ำขึ้น เนื่องจากกระบวนการทอรีแฟคชัน ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะพบว่าชีวมวลจะมีขนาดลดลงเพียงเล็กน้อย แต่จะมีสีที่ดำขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันที่สูงขึ้น และที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส พบว่าชีวมวลจะมีสีดำ และมีขนาดเล็กกล่งอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน จะส่งผลให้สีของชีวมวลมี

ความเข้มข้นจนเป็นสีดำ และขนาดของชีวมวลจะมีขนาดลดลง โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของชีวมวลมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด [26, 40, 41]



รูปที่ 4.2ก ชีวมวลดิบ - กะลาปาล์ม

รูปที่ 4.2ข กะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ 230 °C



รูปที่ 4.2ค กะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ 250 °C



รูปที่ 4.2ง กะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ 270 °C

รูปที่ 4.2 ชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน

4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของของเหลวที่ผ่านกระบวนการควบแน่น

ลักษณะทางกายภาพของของเหลวที่ได้จากการควบแน่นซึ่งใช้น้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีลักษณะต่างๆ ดังรูป 4.3 โดยสังเกตได้ว่า รูปที่ 4.3ก เป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะใสกว่า ไม่เหนียว มีกลิ่นแรง รูปที่ 4.3ข เป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ของเหลวมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ชัน มีกลิ่นแรง รูปที่ 4.3ค เป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ของเหลวมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ชัน มีกลิ่นแรง และเมื่อสังเกตจากปริมาณของของเหลว จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ปริมาณของของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการระเหยของชีวมวลและความชื้นสลายตัวมากขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สที่เกิดในกระบวนการเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อแก๊สบางส่วนเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิห้อง จะส่งผลให้ปริมาณของของเหลวที่ได้จากการควบแน่นเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.3ก ของเหลวที่ได้จากการ
ควบแน่นทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230 °C

รูปที่ 4.3ข ของเหลวที่ได้จากการ
ควบแน่นทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 250 °C



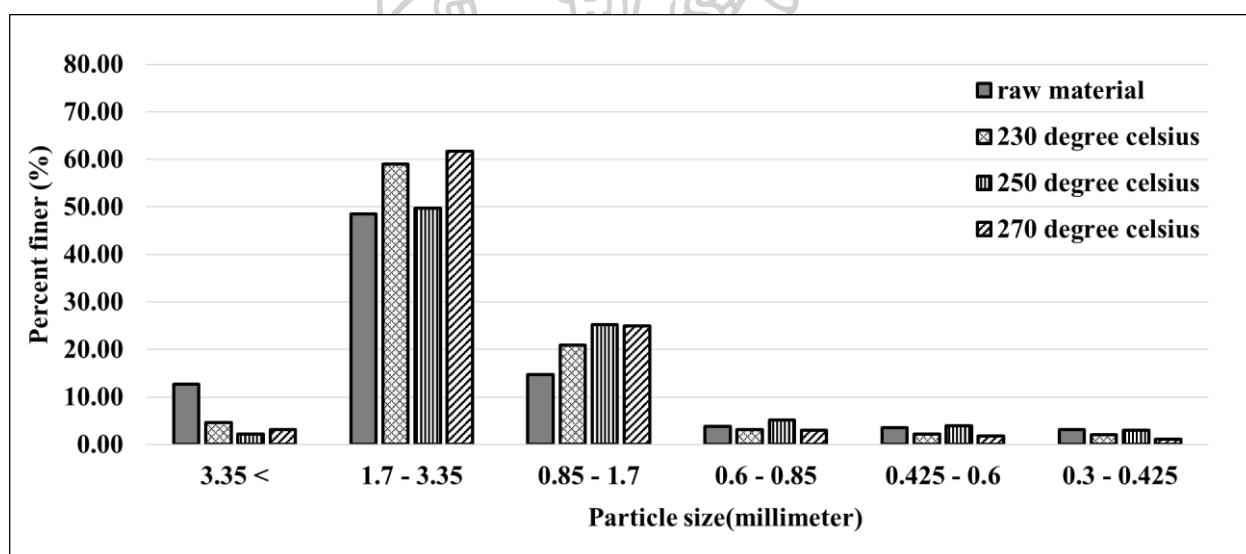
รูปที่ 4.3ค ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 270 °C

รูปที่ 4.3 ของเหลวที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงชีวมวล

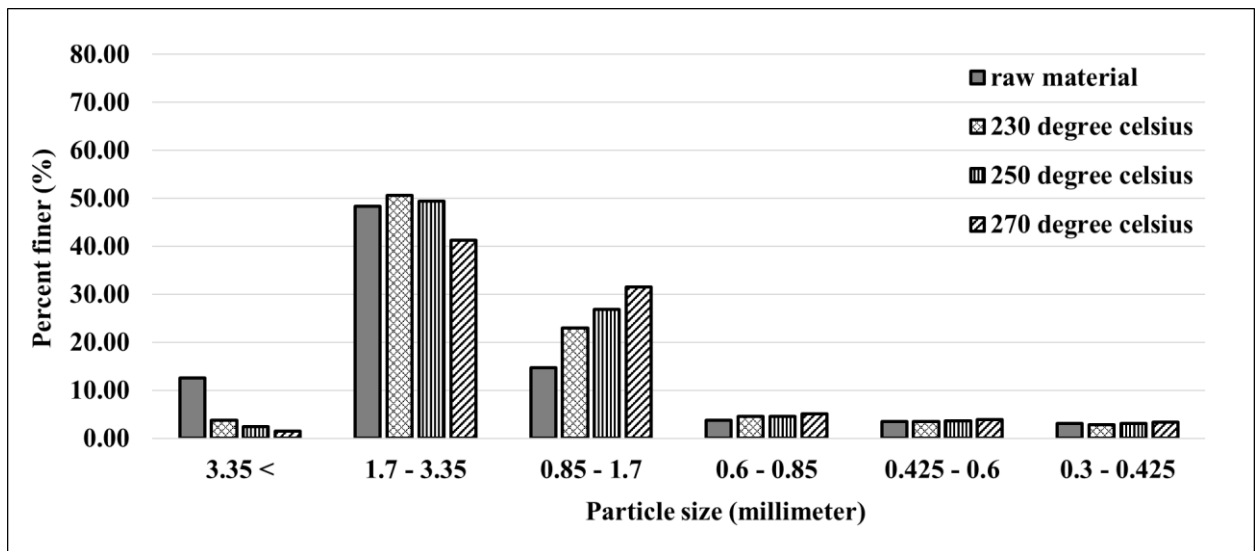
4.1.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

4.1.4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1,2 และ 3 รอบต่อนาที

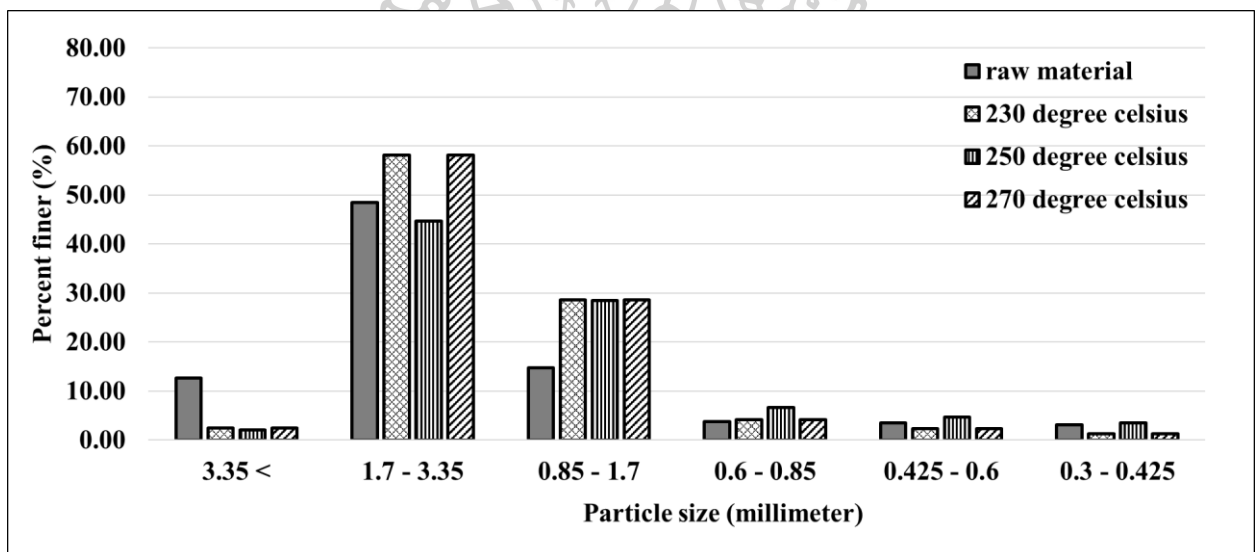
รูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของชีวมวลดิบกะลาปาล์ม โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคชีวมวลทอรีไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของชีวมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 0.85 - 1.7 มิลลิเมตรจะพบว่า ชีวมวลทอรีไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ [23, 26]



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอรีไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

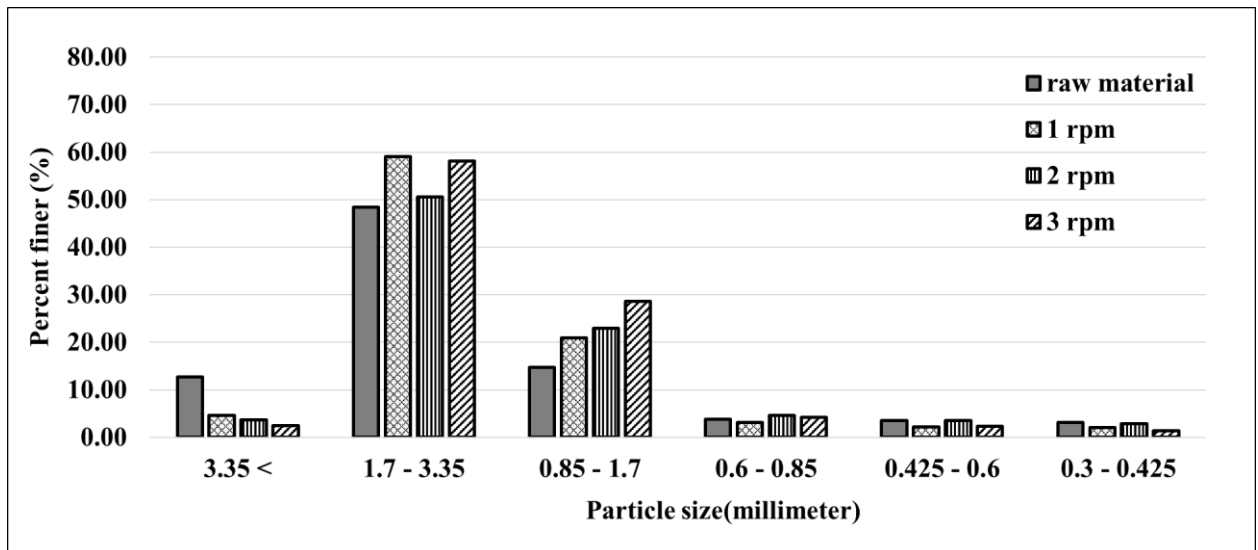


รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

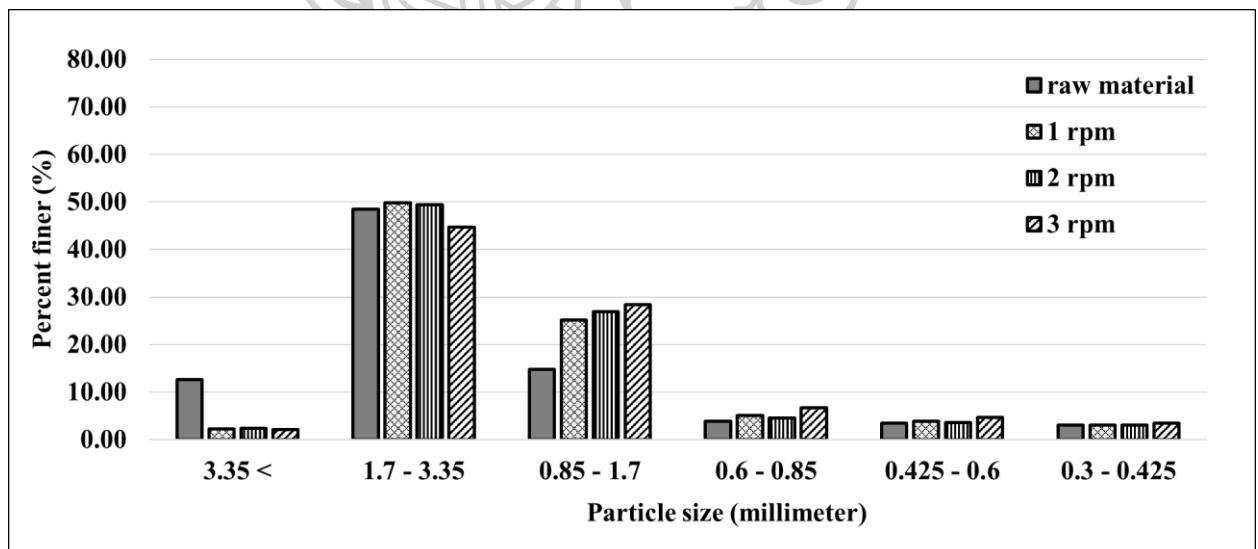
4.1.4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคชีวมวลกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับการกระจายตัวของชีวมวลดิบ นั้นจะถูกแสดงอยู่ดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 โดยจากกราฟจะเห็นว่าขนาดของอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์จะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคชีวมวลดิบ เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง ส่งผลให้ชีวมวลได้รับความร้อนนานขึ้น ทำให้

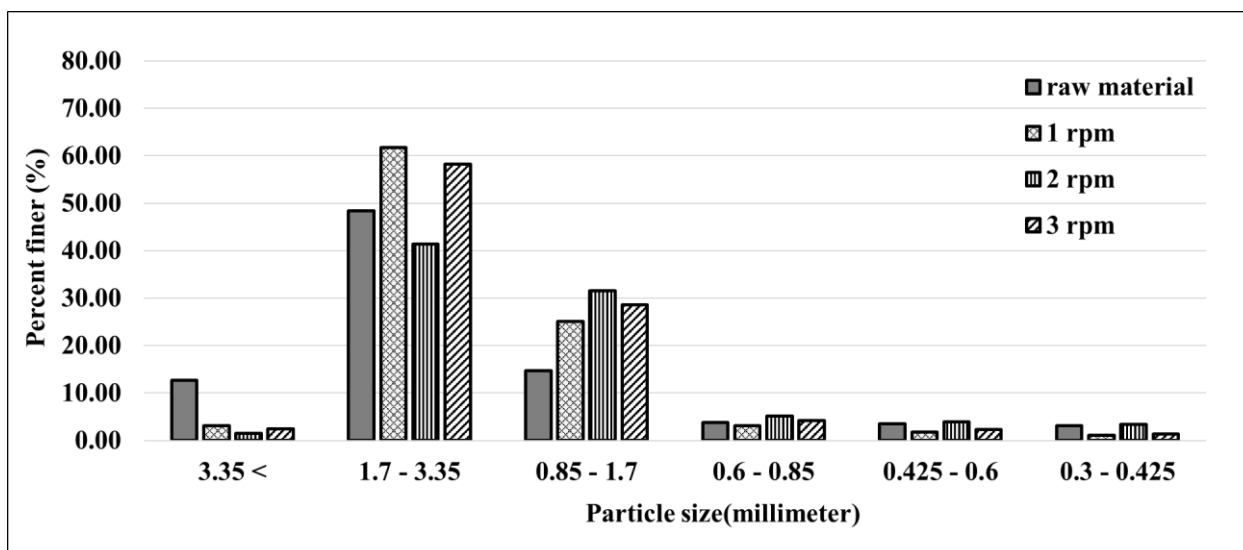
เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้นานขึ้นทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวมากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง และขนาดอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากขนาดอนุภาคในช่วงที่มากกว่า 3.35 มิลลิเมตร นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ และในช่วง 0.85 - 1.7 มิลลิเมตรจะพบว่า ชีวมวลทอริไฟร์นั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

4.1.5 ค่าความร้อน

ค่าความร้อนของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชันนับเป็น 1 ในตัวแปรที่สำคัญ ค่าความร้อนที่สูงนั้นหมายความถึงปริมาณของพลังงานที่ถูกสะสมไว้และสามารถส่งผ่านไปได้ โดยค่าความร้อนของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชันจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองพบว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชันมีค่าเพิ่มมากขึ้น [23, 40, 41] โดยค่าความร้อนสูงสุดนั้นจะอยู่ที่ 28.60 MJ/kg ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส โดยค่าความร้อนที่สูงที่สุดมีค่ามากกว่าชีวมวลดิบ 1.64 เท่า

ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

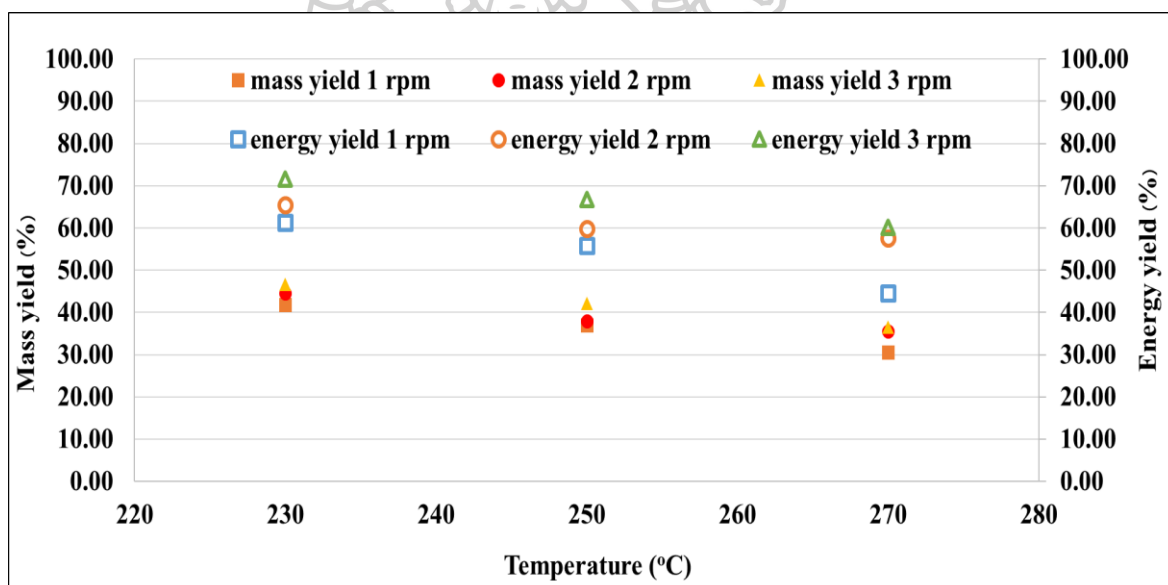
rotational speed (rpm)	Temperature (degree Celsius)	HHV (MJ/kg)	energy yield (%)
1	230	25.53	61.27
	250	26.27	55.82
	270	25.40	44.64
2	230	25.53	65.45
	250	27.50	59.90
	270	28.20	57.51
3	230	26.63	71.51
	250	27.57	66.72
	270	28.60	60.10
raw material		17.40	-

4.1.6 ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

4.1.6.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 1, 2 และ 3 ต่อมาที่แสดงดังในรูปที่ 4.10 พบว่าอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นมีผลกระทบต่อผลได้เชิงมวล โดยผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์นั้นจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้นเพิ่มขึ้น ความชื้นและสารระเหยนั้นจะเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนินในชีวมวล ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที พบว่า ผลได้เชิงมวลมีค่า 41.76, 36.98 และ 30.58 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที พบว่าผลได้เชิงมวลมีค่า 44.60, 37.90 และ 35.48 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที พบว่าผลได้เชิงมวลมีค่า 46.72, 42.11 และ 36.57 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียส โดยผลได้เชิงมวลสูงสุดนั้นพบที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส โดยผลได้เชิงมวลที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้มีการวิจัยมาก่อนหน้าในสำหรับทุกๆชีวมวล [23, 38, 40] ค่าผลได้เชิงพลังงานเป็นตัว

บ่งชี้ถึงการปรับปรุงชีวมวลด้วยกระบวนการทอรีแฟคชัน หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่าแนวโน้มของผลได้เชิงพลังงานนั้นจะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับผลได้เชิงมวล โดยผลได้เชิงพลังงานจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาทีพบว่าผลได้เชิงพลังงานมีค่า 61.27, 55.82 และ 44.64 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาทีพบว่าผลได้เชิงพลังงานมีค่า 65.45, 59.90 และ 57.51 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 and 270 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาทีพบว่าผลได้เชิงพลังงานมีค่า 71.51, 66.72 และ 60.10 เปอร์เซ็นต์สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 270 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยค่าผลได้เชิงพลังงานสูงสุดนั้นพบที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส โดยแนวโน้มของผลได้เชิงพลังงานนั้นมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่มีการศึกษามาก่อนหน้า [42, 43] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการทดลองตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

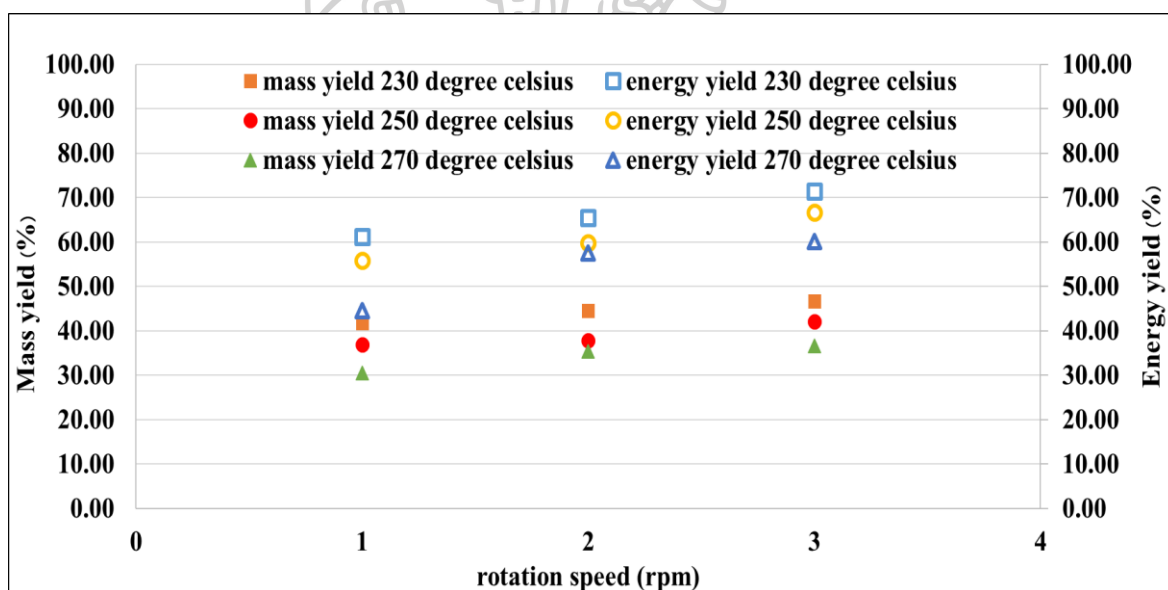


รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

4.1.6.1 ผลของความเร็วรอบที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

ผลของความเร็วรอบที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันแสดงดังในรูปที่ 4.11 โดยพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบสูงจะพบว่าระยะเวลาในการดำเนินการนั้นจะมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ ทำให้ที่ความเร็วรอบที่ต่ำนั้น ความชื้นและสารระเหยมีการสลายตัวมากกว่าที่

ความเร็วรอบสูง ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่า 41.76, 44.60 และ 46.72 เปอร์เซ็นต์สำหรับความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่า 36.98, 37.90 และ 42.11 เปอร์เซ็นต์สำหรับความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่า 30.58, 35.48 และ 36.57 เปอร์เซ็นต์สำหรับความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ผลได้เชิงพลังงานของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแพคชั่นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลได้เชิงมวล ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสพบว่าผลได้เชิงพลังงานมีค่า 61.27, 65.45 และ 71.51 เปอร์เซ็นต์สำหรับความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสพบว่าผลได้เชิงพลังงานมีค่า 55.82, 59.90 and 66.72 เปอร์เซ็นต์สำหรับความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสพบว่าผลได้เชิงพลังงานมีค่า 44.64, 57.51 และ 60.10 เปอร์เซ็นต์สำหรับความเร็วรอบ 1, 2 และ 3 รอบต่อนาที ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทอรีแพคชั่นด้วยเตาเผาแบบหมุนคือ ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 ผลของความเร็วรอบที่มีต่อผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงาน

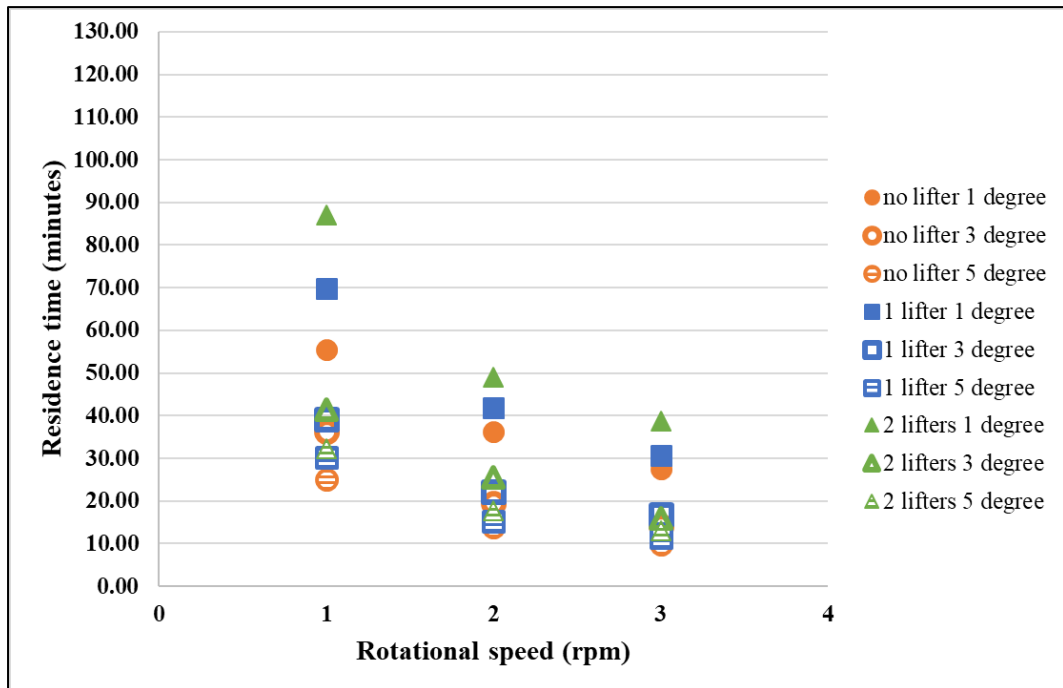
ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแพคชั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงและผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊สมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานลดลง โดยถ้ามองในมุมของค่าความร้อนสถานะที่เหมาะสมที่สุดคือความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสเนื่องจากมีค่าความร้อน

สูงที่สุด คือ 28.60 MJ/kg แต่ถ้ามองที่ผลได้เชิงพลังงาน สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีผลได้เชิงพลังงานสูงสุดคือ 71.51 เปอร์เซ็นต์

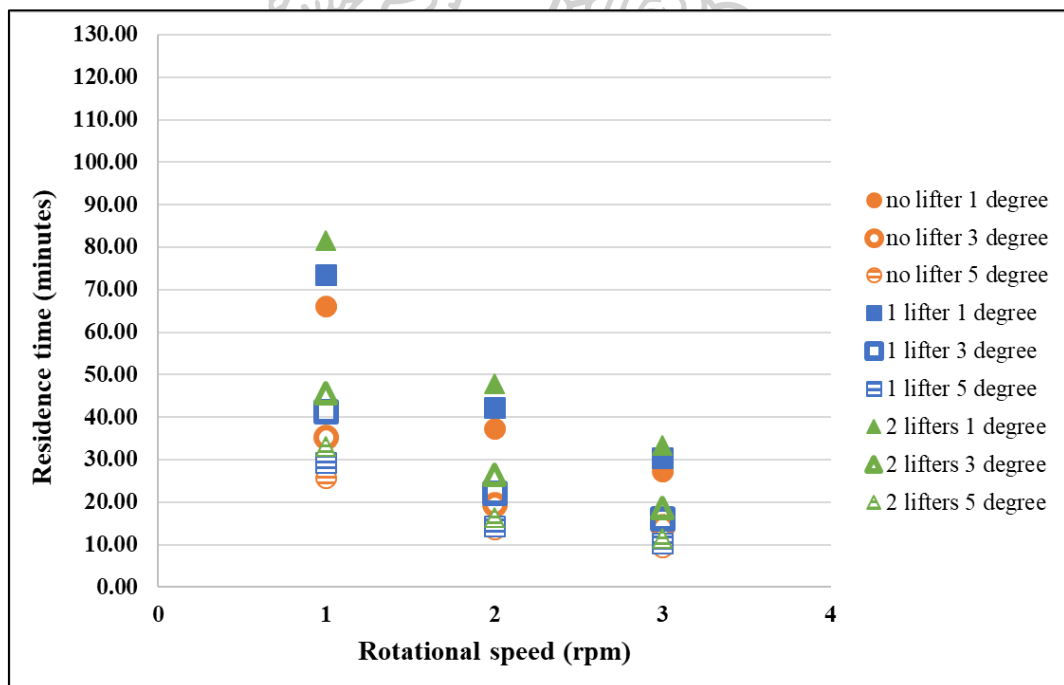
4.2 ผลของตัวแปรที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

4.2.1 ผลของความเร็วยุโรปที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

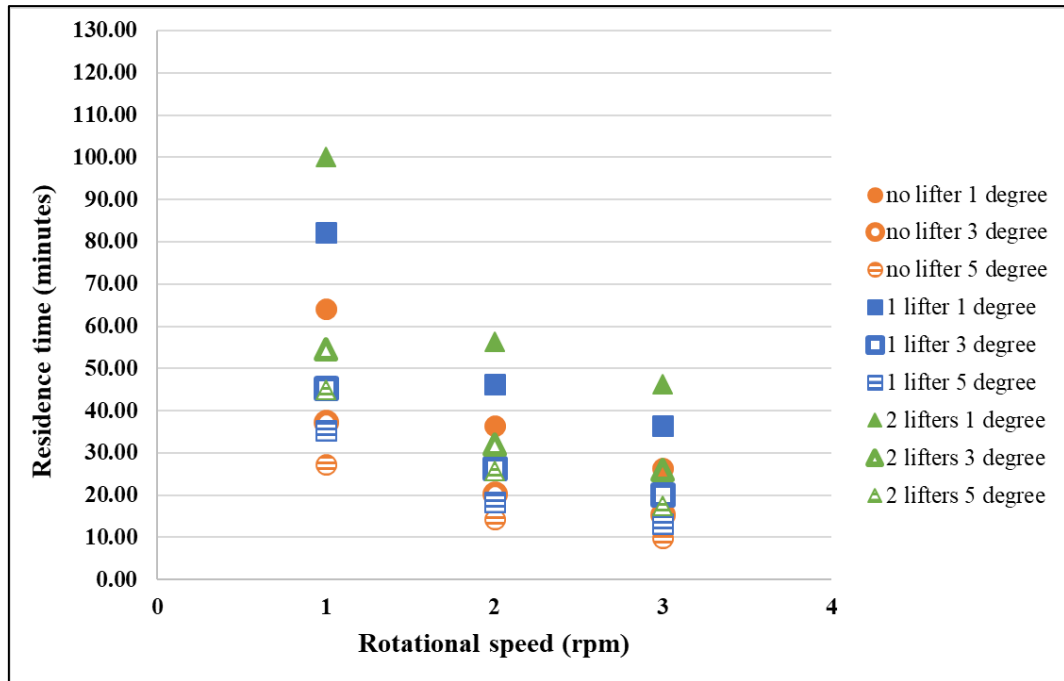
รูปที่ 4.12 ถึง 4.15 แสดงถึงผลของความเร็วยุโรปการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวล กะลาปาล์ม, ชั่งข้าวโพด, กระจิน และแกลบ ตามลำดับ โดยจากการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วยุโรปการหมุนของเตาเผาแบบหมุนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนนั้นมีค่าลดลง โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความเร็วยุโรปการหมุนของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้นจาก 1 รอบต่อนาที เป็น 3 รอบต่อนาที ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสาเหตุที่ระยะเวลาการดำเนินการลดลงนั้นเนื่องมาจากเมื่อความเร็วยุโรปการหมุนของเตาเผาแบบหมุนนั้นเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วการเคลื่อนที่ในแนวแกนของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุนนั้นเพิ่มขึ้นด้วย โดยแนวโน้มการลดลงของระยะเวลาการดำเนินการนั้นจะมีทิศทางเดียวกันในทุกๆ มุมโน้มเอียง และทุกๆ จำนวนใบกวนภายในเตาเผา โดยแนวโน้มที่ได้จะมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการศึกษามาก่อนหน้า [21, 24, 33, 34, 44] และพบว่าที่ความเร็วยุโรปที่มากระดับการลดลงของระยะเวลาการดำเนินการจะมีค่าน้อยลง สังเกตได้จากความชันของระยะเวลาการดำเนินการของชุดข้อมูลจากความเร็วยุโรปการหมุน 1 รอบต่อนาที ไปยังความเร็วยุโรปการหมุน 2 รอบต่อนาทีจะค่าความชันของกราฟที่มากกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วยุโรปการหมุน 2 รอบต่อนาทีไปยังความเร็วยุโรปการหมุน 3 รอบต่อนาที และจากงานวิจัยของ Chen et al. (2009) ได้กล่าวไว้ว่า การเคลื่อนที่ของอนุภาคตามแนวแกนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของชั้นวัสดุ (active layer) โดยในขณะที่อนุภาคในบริเวณด้านล่างของชั้นวัสดุจะถูกทำให้เคลื่อนที่ขึ้นไปเนื่องจากการหมุนของผนังเตาเผาแบบหมุนโดยไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน ดังนั้นเมื่อความเร็วยุโรปการหมุนของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มมากขึ้นเวลาที่อนุภาคของวัสดุจะเข้าสู่ชั้น active layer ของวัสดุต่อหน่วยเวลาจะเพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวแกนเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการมีค่าลดลง [45] ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเร็วยุโรปการหมุนของเตาเผาแบบหมุนมีค่าเพิ่มส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนนั้นลดลง



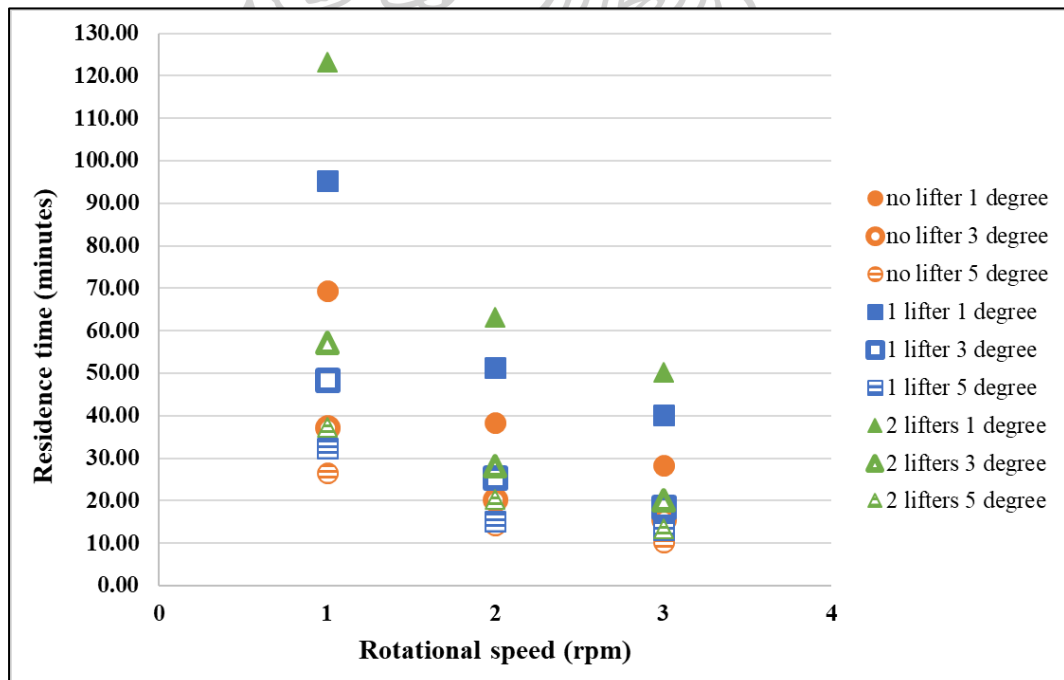
รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วยรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของ
ชีวมวลกะลาปาล์ม



รูปที่ 4.13 ผลของความเร็วยรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของ
ชีวมวลซังข้าวโพด



รูปที่ 4.14 ผลของความเร็รรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของ
ชีวมวลกระถิน

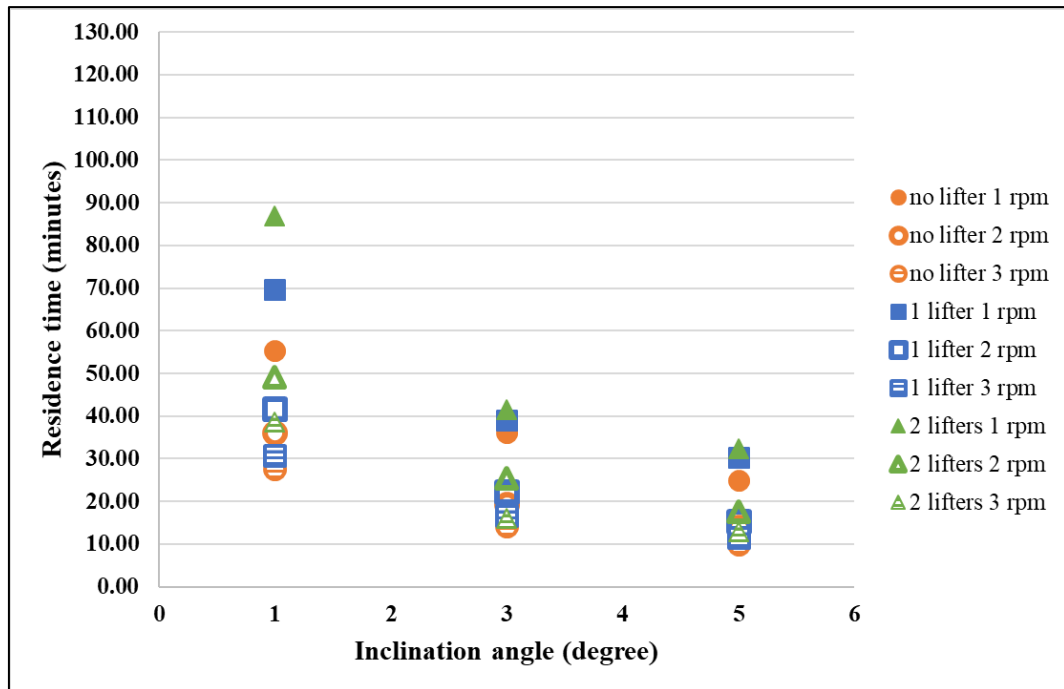


รูปที่ 4.15 ผลของความเร็รรอบการหมุนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของ
ชีวมวลแกลบ

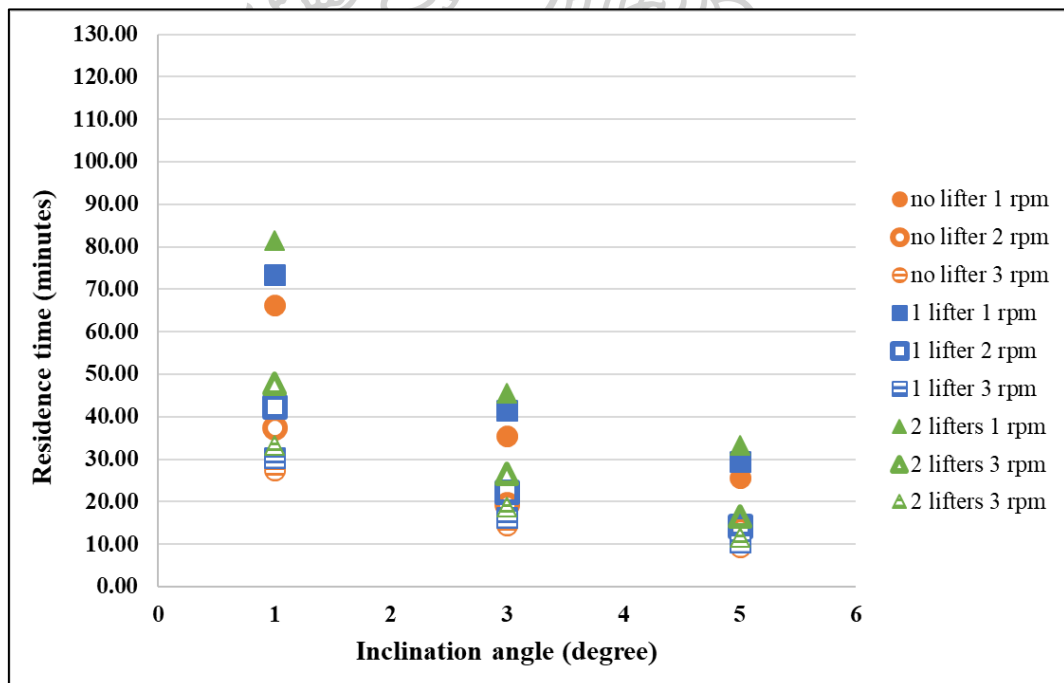
4.2.2 ผลของมูมิโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

ผลของมูมิโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของซีมวอลกะลาปาล์ม, ซังข้าวโพด, กระจดิน และแกลบ แสดงดังในรูปที่ 4.16 ถึง 4.19 ตามลำดับโดยจากการทดลองพบว่าระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมูมิโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุนมีค่าเพิ่มมากขึ้น [21, 24, 33, 34, 44] พบว่าแนวโน้มการลดลงของระยะเวลาการดำเนินการนั้นมีความคล้ายกันในทุกซีมวอล ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาการดำเนินการนั้นจะลดลงเมื่อความชันของเตามีค่าเพิ่มขึ้น โดย Chen et al. (2009) ได้อธิบายว่าระหว่างที่อนุภาคภายในเตาเผาแบบหมุนเคลื่อนที่ อนุภาคของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุนจะเคลื่อนที่ไปตามรัศมีของเตาเผาแบบหมุนเนื่องจากผลของแรงเสียดทาน จนกระทั่งวัสดุเคลื่อนที่ไปจนถึงมุมรีโพลของวัสดุ หลังจากนั้นวัสดุจะเคลื่อนที่ตกลงมาตามพื้นผิวของชั้นวัสดุเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วง ซึ่งการที่มูมิโน้มเอียงของเตาเผาเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การตกลงของวัสดุภายในเตาเผาที่เกิดจากผลแรงโน้มถ่วงมีค่าเพิ่มมากขึ้นและผลที่ได้คือความเร็วการเคลื่อนที่ของวัสดุในแนวแกนมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนมีค่าลดลง [45] ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมูมิโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุนมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนมีค่าลดลง

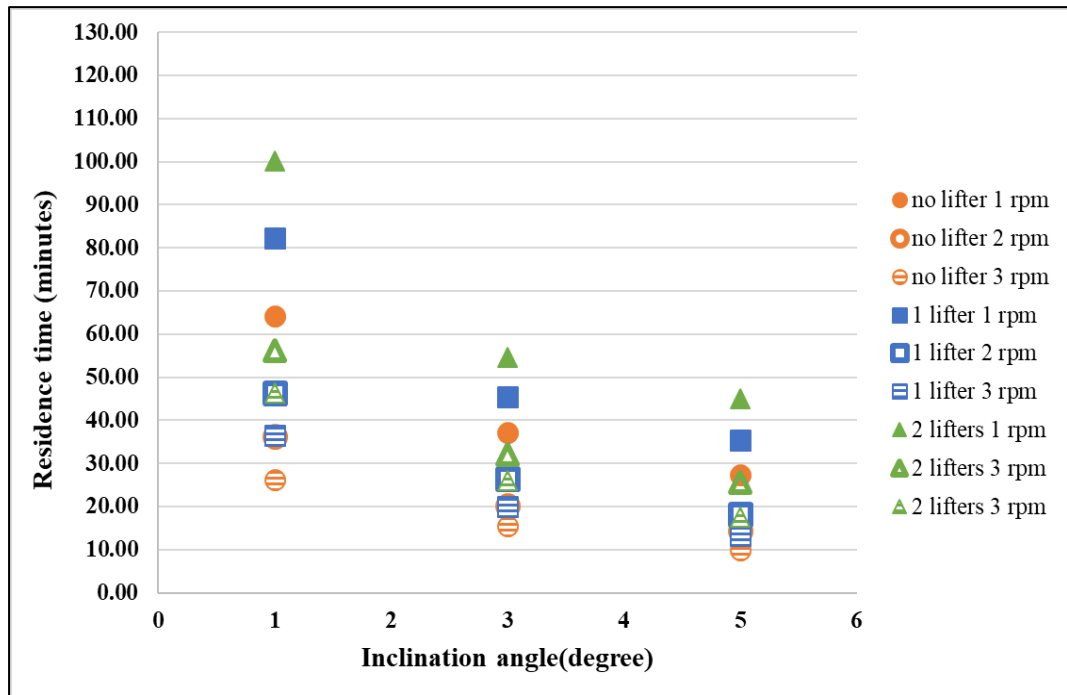




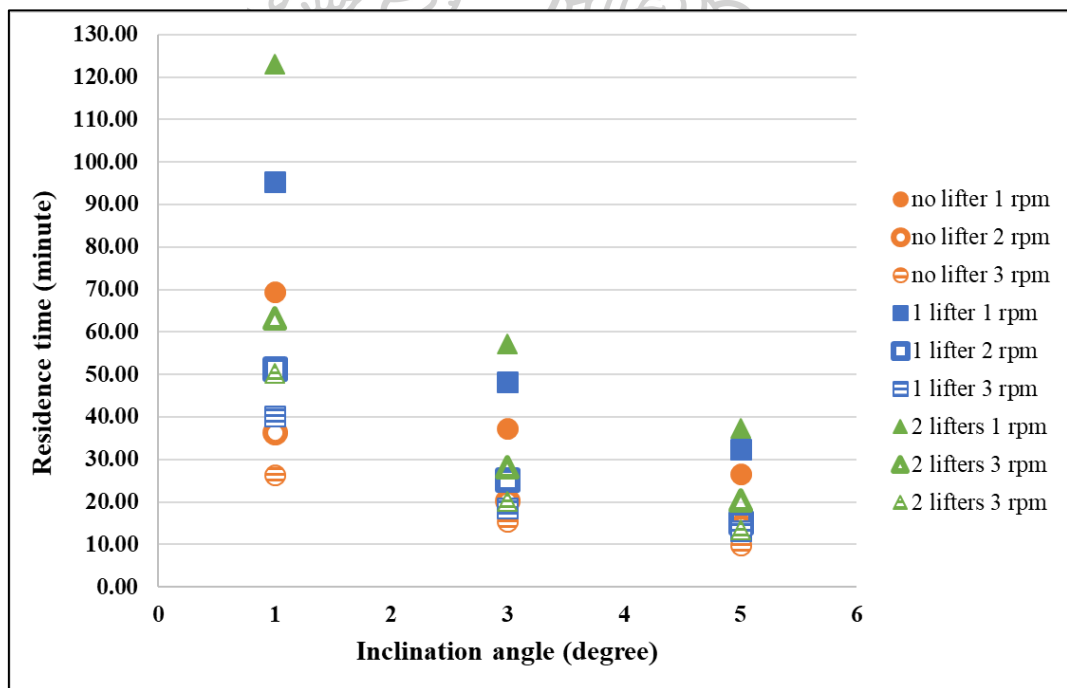
รูปที่ 4.16 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกะลา
ปาล์ม



รูปที่ 4.17 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลซัง
ข้าวโพด



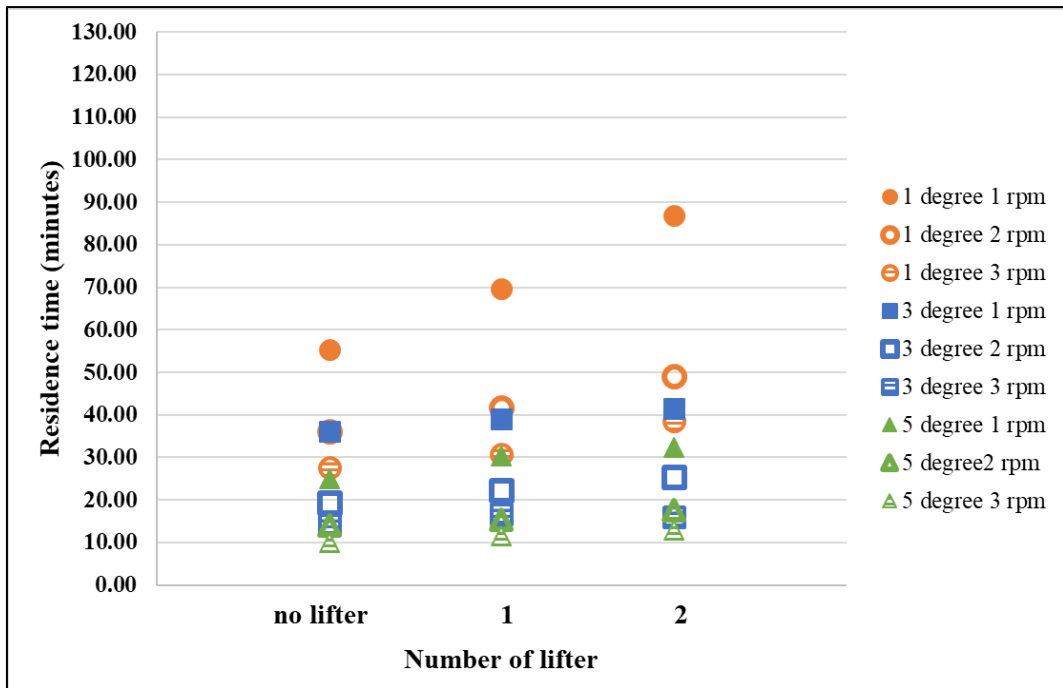
รูปที่ 4.18 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกระถิน



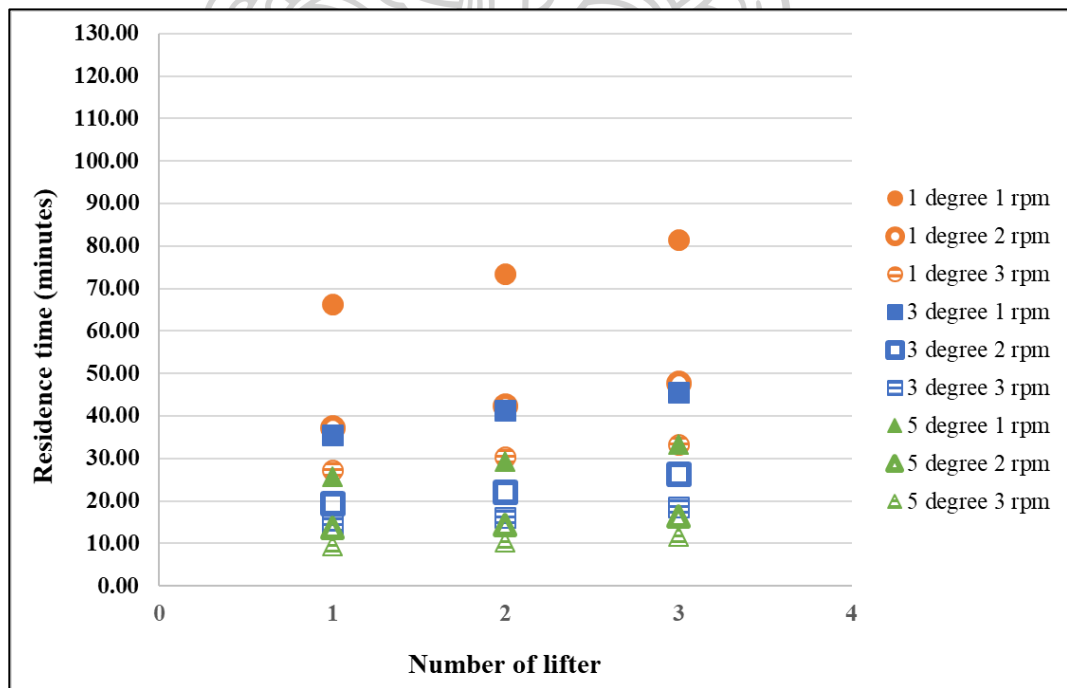
รูปที่ 4.19 ผลของมุมโน้มเอียงที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกล้วย

4.2.3 ผลของไวกวนที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

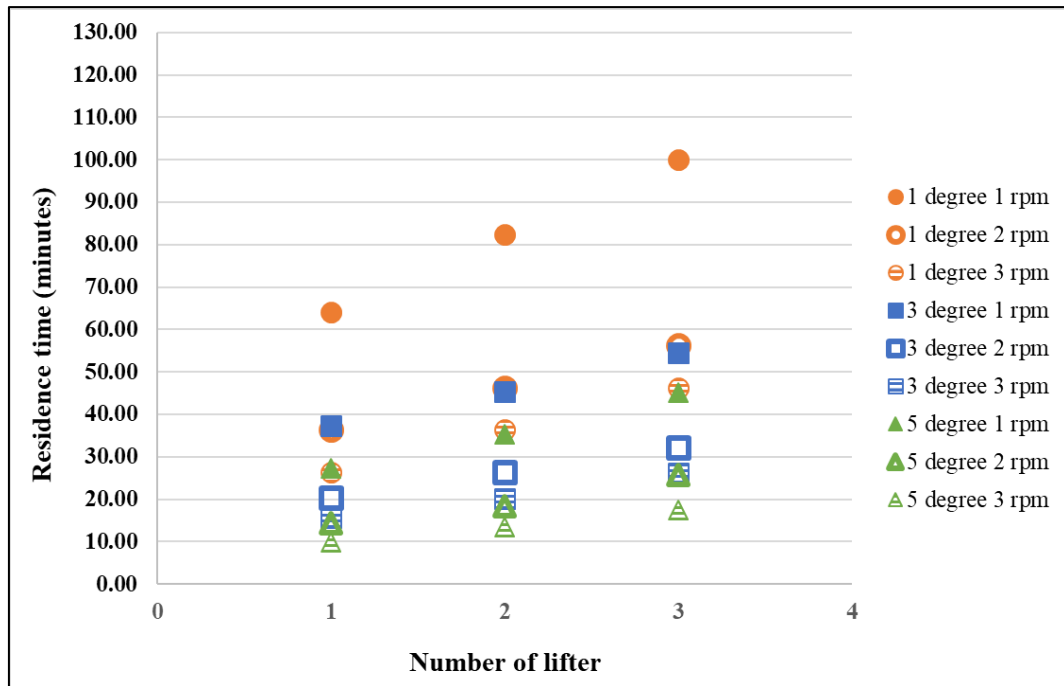
ผลของจำนวนไวกวนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลกะลาปาล์ม, ชั่งข้าวโพด, กระจิน และแกลบ แสดงดังในรูปที่ 4.20, 4.21, 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อจำนวนไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นว่าแนวโน้มของกราฟที่เพิ่มขึ้นของระยะเวลาการดำเนินการนั้นจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาการดำเนินการเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายได้จากลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเตาเผาแบบหมุน โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคของวัสดุภายในเตาเผาแบบหมุนในขณะที่ยังไม่มีไวกวนนั้นจะเคลื่อนที่ไปตามรัศมีของเตาเผาแบบหมุนเนื่องจากผลของแรงเสียดทานจนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงมุมรีโพสหลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ตกกลับลงมาเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วง แต่ในขณะที่มีไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุน จะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นทั้งหมด 2 รูปแบบด้วยกัน กล่าวคือส่วนหนึ่งของวัสดุภายในเตาเผาจะเคลื่อนที่ตามรูปแบบเดิมเหมือนในขณะที่ยังไม่มีไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุน อีกส่วนหนึ่งของวัสดุจะถูกไวกวนตักขึ้นไปในแนวรัศมีของการเคลื่อนที่ของไวกวน จากนั้นเมื่อไวกวนเคลื่อนที่ไปถึง R-II ของเตาเผาแบบหมุนวัสดุจะเริ่มตกลงมาเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วง โดยรูปแบบการตกของวัสดุในไวกวนแสดงดังในรูปที่ 3.14 โดยในระหว่างที่วัสดุถูกไวกวนตักขึ้นไปด้วยนั้นจะไม่มีเคลื่อนที่ของวัสดุเกิดขึ้น [36] จึงเป็นเหตุผลเมื่อมีไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุนส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้น และยังจำนวนไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุนเท่ากับระยะเวลาที่วัสดุถูกตักขึ้นไปพร้อมกับไวกวนมีมากขึ้นตามไปด้วย [20] โดยรูปที่ 4.24 จะแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของวัสดุในขณะที่ยังไม่มีไวกวนในเตาเผาและมีไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าจำนวนไวกวนภายในเตาเผาแบบหมุนยิ่งมากส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการภายในเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



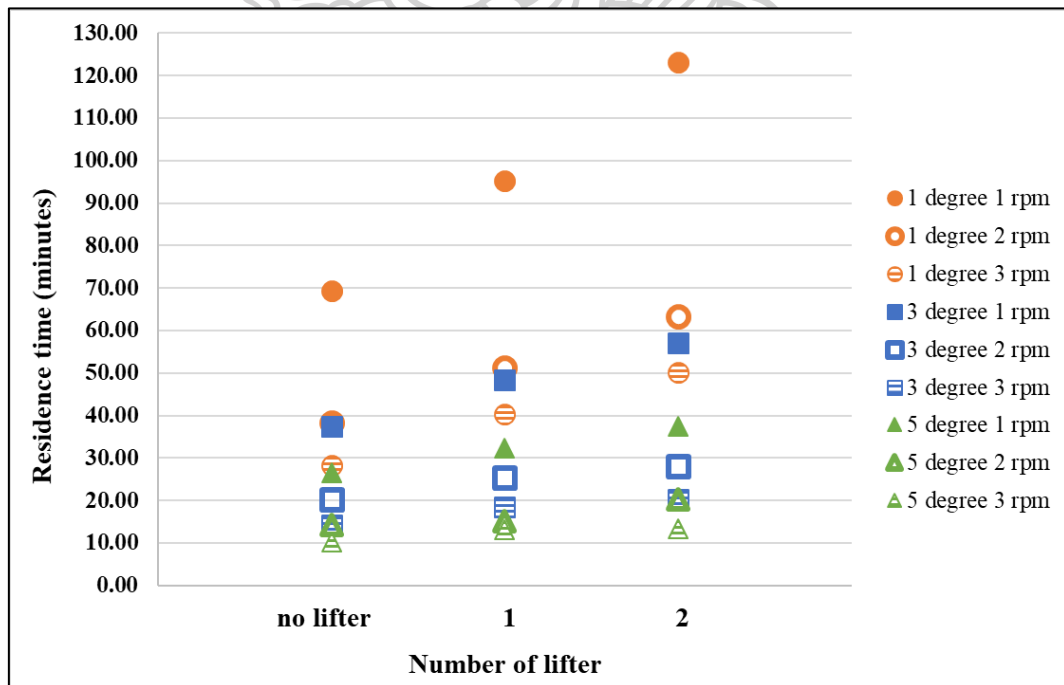
รูปที่ 4.20 ผลของจำนวนใบกววนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวล
กะลาปาล์ม



รูปที่ 4.21 ผลของจำนวนใบกววนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวลซึ่ง
ข้าวโพด



รูปที่ 4.22 ผลของจำนวนใบกววนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวล กระถิน



รูปที่ 4.23 ผลของจำนวนใบกววนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนของชีวมวล แกลบ



4.24ก การเคลื่อนที่ของวัสดุในเตาเผาแบบหมุนแบบไม่มีใบกวน



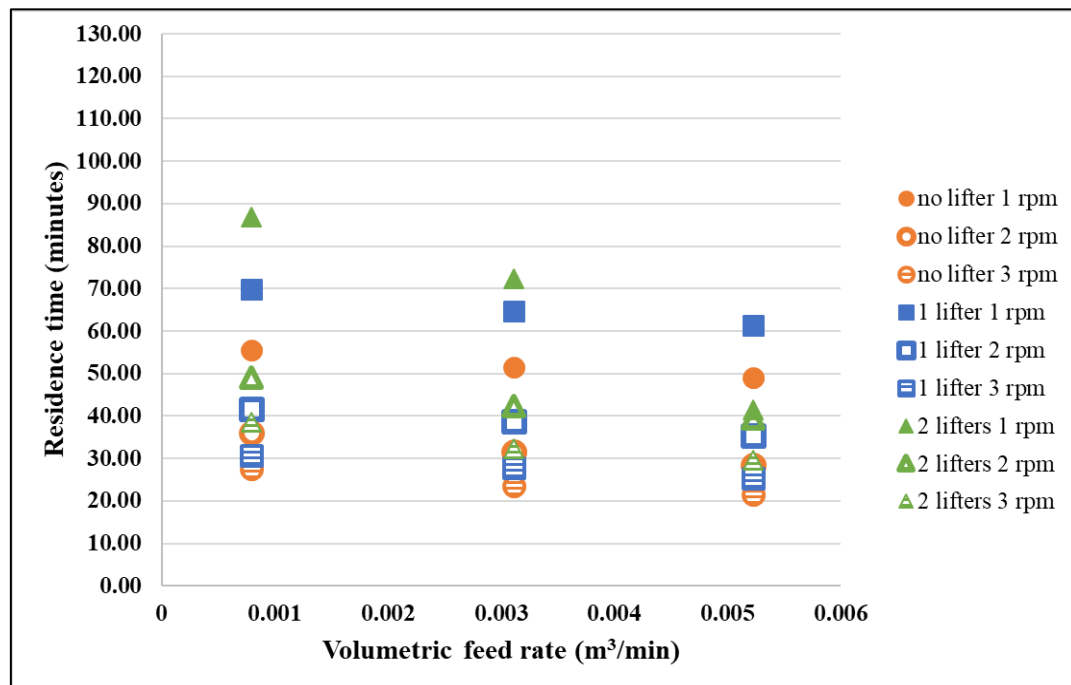
4.24ข การเคลื่อนที่ของวัสดุในเตาเผาแบบหมุนแบบมีใบกวน 2 ใบ

รูปที่ 4.24 แสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของวัสดุในขณะที่ไม่อยู่ในกวนในเตาเผาและมีใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน

4.2.4 ผลของอัตราการป้อนที่มีต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

รูปที่ 4.25 แสดงถึงผลของอัตราการป้อนที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน โดยพบว่าเมื่ออัตราการป้อนของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่เตาเผาแบบหมุนมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ปริมาณของวัสดุที่อยู่ภายในเตาเผาแบบหมุนในบริเวณที่วัสดุตกสู่เตาเผาแบบหมุนมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดการทับถมของวัสดุอยู่ภายในเตาเผา เมื่อปริมาณของวัสดุที่ทับถมอยู่ภายในเตาเผาเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่ง จะเกิดการถล่มลงมาเนื่องจากผลของการหมุนของเตาเผาแบบหมุน

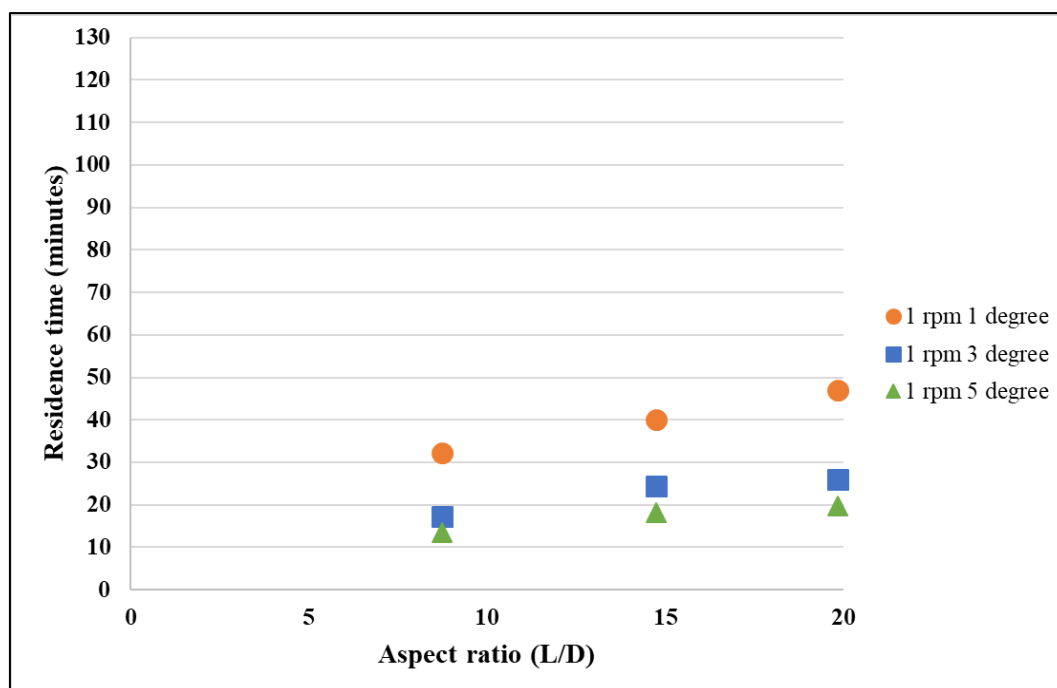
ทำให้วัสดุที่ถล่มลงมานั้นทำหน้าที่ในการดันให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามแนวแกนของเตาเผาแบบหมุน ส่งผลให้ระยะเวลาในการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนนั้นลดลง [21, 34, 44]



รูปที่ 4.25 ผลของอัตราการป้อนที่มีผลต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

4.2.5 ผลของอัตราส่วนสันทัดที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

รูปที่ 4.26 แสดงถึงผลของอัตราส่วนสันทัดที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน โดยอัตราส่วนสันทัดในการทดลองคือผลของ ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือ L/D จากการทดลองพบว่า เมื่อความยาวของเตาเผาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะทางที่วัสดุเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการมีค่าลดลง และพบว่าเมื่อค่าของอัตราส่วนสันทัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มมากขึ้น [34] และจากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนสันทัดที่มีค่าเท่ากัน ระยะเวลาดำเนินการจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าค่าของอัตราส่วนสันทัดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.26 ผลของอัตราส่วนส้นตัดที่มีต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

4.3 สมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

จากการศึกษาก่อนหน้านี้จะพบว่าไม่ได้มีเพียงแค่ตัวแปรเพียงตัวแปรเดียวที่ส่งผลต่อระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน ดังนั้นจึงต้องมีการรวมเอาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการ โดยเริ่มจากการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน โดยตัวแปรที่ส่งผลประกอบด้วย ความเร็วรอบการหมุนของเตาเผา มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน ความยาวของเตาเผาแบบหมุน เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาแบบหมุน อัตราการป้อนเชิงปริมาตรของวัสดุ มุมรีโพลของวัสดุ จำนวนของใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน ดังสมการ

$$MRT = f(n, \beta, L, D, V, \theta, N) \quad (4.1)$$

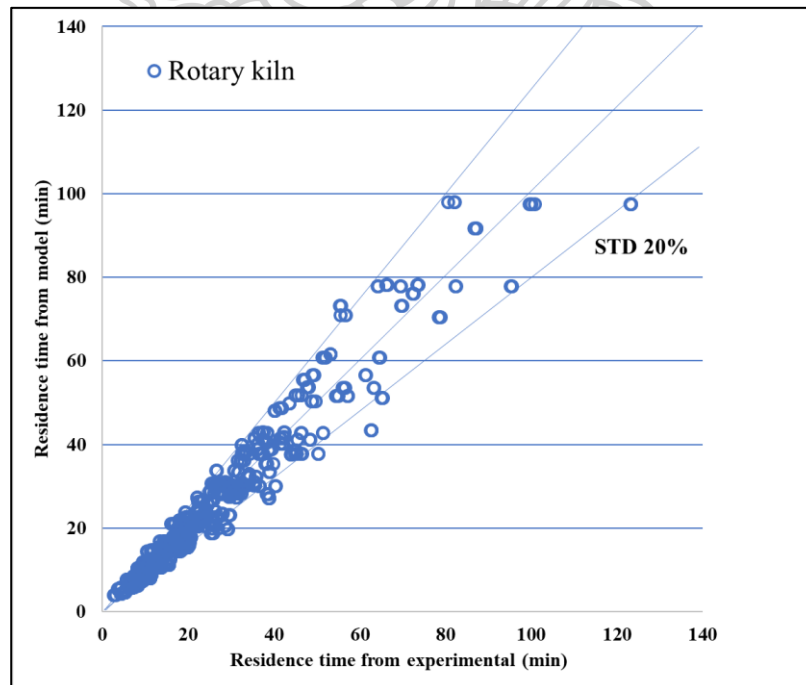
เพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน จะใช้การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติตามทฤษฎี Buckingham pi เพื่อหากลุ่มของตัวแปรที่มีมิติสัมพันธ์กัน จากนั้นจะให้วิธีกำลังสองถดถอยน้อยสุด (least square method) เพื่อนำไปใช้ในการทำนายค่าระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน โดยจะใช้ข้อมูลจากการทดลองในงานวิจัยนี้จำนวนชุดข้อมูล ซึ่งสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาการดำเนินการจะเป็นดังสมการที่

$$MRT = 1.4667 \frac{D^3}{\dot{V}} (\beta)^{-0.569897} \left(\frac{D^3(n)}{\dot{V}} \right)^{-0.86459} (\theta)^{0.2457} \left(\frac{L}{D} \right)^{0.8669645} (N)^{-10.4687} \quad (4.2)$$

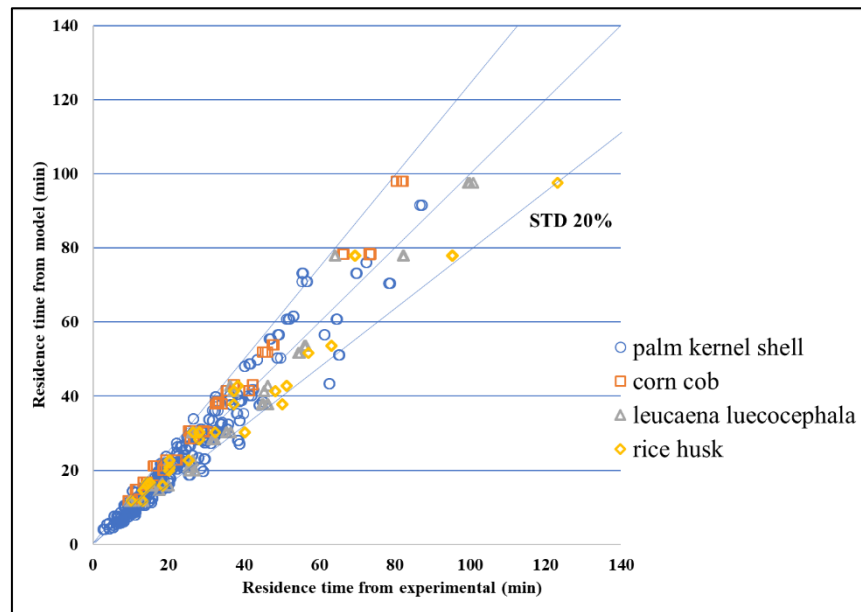
โดยกลุ่มตัวแปรไร้มิติ N อธิบายถึงจำนวนใบกวนภายในเตาแบบหมุน โดยที่จำนวนของใบกวนนั้นเป็นหน่วยที่ไม่มีระบบมิติ ดังนั้นจะได้ว่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ $N = \frac{4S_{lift}}{\pi D^2}$ และเมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้สมการสำหรับทำนายระยะเวลาการดำเนินการคือ

$$MRT = 1.4667 \frac{D^3}{\dot{V}} (\beta)^{-0.569897} \left(\frac{D^3(n)}{\dot{V}} \right)^{-0.86459} (\theta)^{0.2457} \left(\frac{L}{D} \right)^{0.8669645} \left(\frac{4S_{lift}}{\pi D^2} \right)^{-10.4687} \quad (4.3)$$

รูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงถึงผลของระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองเทียบกับระยะเวลาดำเนินการจากการทำนาย โดยรูปที่ 4.28 จะแสดงถึงชนิดของชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง พบว่าข้อมูลที่ได้มานั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 12.54 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 8.86 เปอร์เซ็นต์



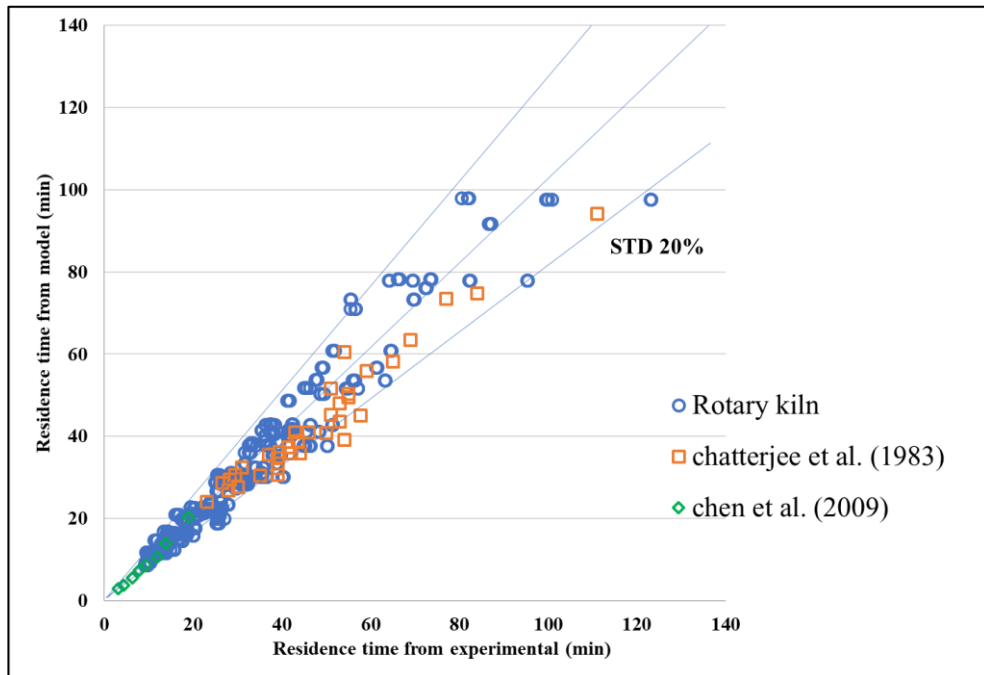
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาดำเนินการทำนาย



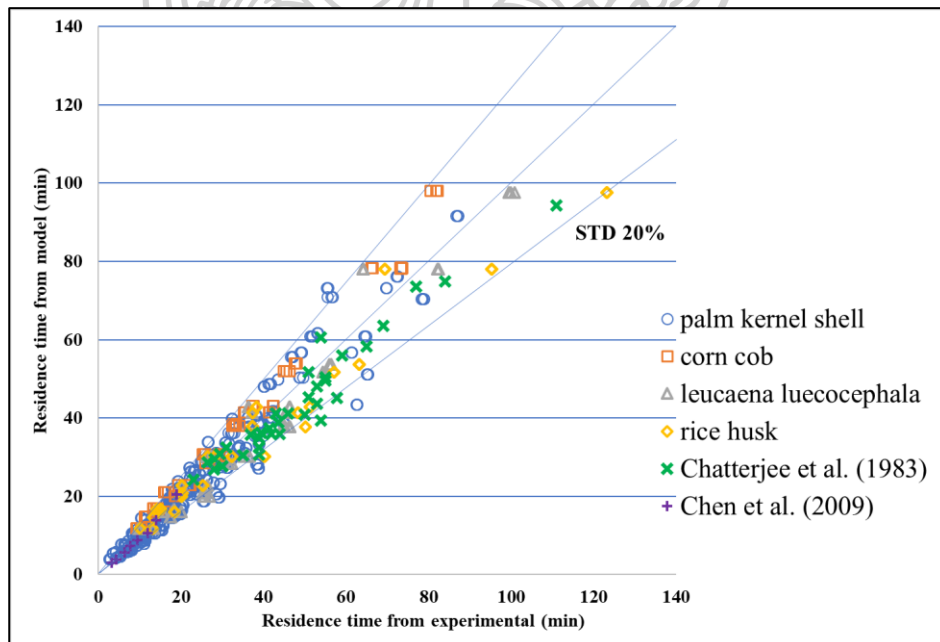
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาจากการทำนาย

เนื่องจากสมการสหสัมพันธ์นี้ได้มาจากการทดลองในงานวิจัยเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงมีการนำสมการสหสัมพันธ์นี้ไปเทียบกับงานวิจัยที่มีการศึกษามาก่อนหน้าเพื่อหาความแม่นยำในการทำนายว่าสมการสหสัมพันธ์ที่ได้มา มีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยนำงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chatterjee et al. (1983) และ Chen et al. (2009) มาเปรียบเทียบกับค่าระยะเวลาดำเนินการ โดยลักษณะของเตาเผาแบบหมุนจะมีลักษณะที่เหมือนกันและไม่มีใบกวนภายในเตาเผา

จากการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลงานวิจัยของ Chatterjee et al. (1983) มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 10.63 เปอเซ็นต์ และมีค่าการกระจายตัวที่ 5.98 เปอเซ็นต์ และจากงานวิจัยของ Chen et al. (2009) มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.94 เปอเซ็นต์ และมีค่าการกระจายตัวที่ 3.55 เปอเซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 และพบว่าแนวโน้มที่เกิดจากตัวแปรต่างๆในการทดลอง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาจากการทำนายเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้า



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการจากการทดลองและระยะเวลาจากการทำนายเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้า

ดังนั้นจากผลการทดลองและจากสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของ
เตาเผาแบบหมุนสามารถสรุปได้ว่าสมการสหสัมพันธ์สามารถใช้ทำนายระยะเวลาดำเนินการของ
เตาเผาแบบหมุนได้จริง ในกรณีที่เตาเผาแบบหมุนมีลักษณะที่เหมือนกัน



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 คุณสมบัติของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่อชีวมวลกะลาปาล์มผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นพบว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีค่าลดลงเนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบภายในชีวมวลและส่งผลให้ปริมาณของเหลวและแก๊สที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีค่าเพิ่มมากขึ้น และพบว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าที่สูงขึ้นแต่ในทางกลับกันผลได้เชิงมวลและผลได้เชิงพลังงานจะมีค่าลดลง การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีแนวโน้มการกระจายตัวอยู่ที่ขนาดภาคอยู่ในช่วง 0.85 – 3.35 เมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ เนื่องจากการสลายตัวในระหว่างกระบวนการ ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบและพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการกระบวนการทอรีแฟคชั่นจากการทดลองคืออุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที เนื่องจากมีค่าผลได้เชิงพลังงานที่สูงที่สุด

5.1.2 ผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุน มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน อัตราการป้อนเชิงปริมาตร จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน อัตราส่วนสกัดของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาแบบหมุน โดยจากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุน มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน และอัตราการป้อนเชิงปริมาตรของวัสดุ มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการมีค่าลดลง ในทางกลับกันเมื่อจำนวนใบกวนภายในเตาเผาและค่าอัตราส่วนสกัดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการดำเนินการมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุน มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน อัตราการป้อนเชิงปริมาตรของวัสดุ จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน และอัตราส่วนสกัดมีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการ โดยระยะเวลาการดำเนินการที่มากที่สุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบการหมุน 1 รอบต่อนาที มุมโน้มเอียง 1 องศา จำนวนใบกวน 2 ใบ ความยาวเตา 6

เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร และระยะเวลาที่น้อยที่สุดอยู่ที่ความเร็วรอบการหมุน 3 รอบต่อนาที มุมโน้มเอียง 5 องศา ไม่มีใบกวน ความยาวเตาเผา 1.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร

5.1.3 สมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

จากสมการสหสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นพบว่า สมการสามารถทำนายระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุนได้ โดยสมการที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 12.54 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 8.86 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำผลจากงานวิจัยของ Chatterjee et al. (1983) มาใช้ในสมการสหสัมพันธ์พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 10.63 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5.98 เปอร์เซ็นต์ และจากงานวิจัยของ Chen et al. (2009) มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.94 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.55 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาการดำเนินการเฉลี่ยของเตาเผาแบบหมุนนั้นสามารถใช้ในการทำนายระยะเวลาดำเนินการเฉลี่ยได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

สมการสหสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจากผลการทดลองของผู้วิจัยสามารถใช้ในการทำนายระยะเวลาการดำเนินการเฉลี่ยได้ในกรณีของเตาเผาแบบหมุนที่ไม่มีใบกวน หรือมีใบกวนแบบมุมฉาก และไม่มีผนังกันที่ทางออกของเตาเผาแบบหมุน (dam) ดังนั้นเพื่อให้ได้สมการที่สามารถทำนายระยะเวลาการดำเนินการได้แม่นยำและครอบคลุมเตาเผาแบบหมุนมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยเห็นว่าควรมีการศึกษาลักษณะของใบกวนรูปแบบต่างๆที่ส่งผลต่อระยะเวลาการดำเนินการและความสูงของผนังกันบริเวณทางออกของเตาเผาแบบหมุนเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้สมการสหสัมพันธ์ที่แม่นยำและใช้ได้กับเตาเผาแบบหมุนที่มีผนังกันบริเวณทางออกได้

รายการสัญลักษณ์

a	เวลาของการจุดระเบิด	min
b	เวลาเมื่ออุณหภูมิถึง 60% ของที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด	min
c	เวลาที่เริ่มต้นของคาบ (หลังจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น)ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลายเป็นคงที่	min
t	อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ถูกต้อง	°C
t _c	อุณหภูมิสุดท้ายที่อ่านได้	°C
t _a	อุณหภูมิที่อ่านได้ที่เวลาจุดระเบิด	°C
r ₁	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง 5 นาทีก่อนจุดระเบิด	°C/min
r ₂	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง 5 นาทีหลังจากเวลาที่เริ่มต้นของคาบ c	°C/min
H _g	ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้	J/g
W	ค่าความจุความร้อนของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์	cal/°C
m	มวลของตัวอย่าง	g
e ₁	ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ HNO ₃ 23.9 แคลอรี	cal
e ₂	ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ H ₂ SO ₄	cal
e ₃	ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)	cal
W ₀	น้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิง	g
W _f	น้ำหนักสุดท้ายของเชื้อเพลิง	g
M	ค่าความชื้น	%
ρ_{bulk}	ความหนาแน่นบักก์	Kg/m ³
m _f	มวลของวัตถุที่ต้องการวัด	kg
V _b	ปริมาตรของกล่อง (ลูกบาศก์เมตร)	m ³
PDI	ค่าความหนาแน่นแห้งเชื้อเพลิง	%
WPW	น้ำหนักแห้งชีวมวลที่สมบูรณ์ไม่แตกหัก	kg
IW	น้ำหนักแห้งชีวมวลเริ่มต้น	kg
MRT	ระยะเวลาในการดำเนินการ	min
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	m
L	ความยาวของเตา	m

\dot{V}	อัตราการป้อนเชิงปริมาตร	m ³ /min
θ	มุมรีโพลของวัสดุ	degree
β	มุมโน้มเอียงของเตาเผา	degree
n	ความเร็วรอบในการหมุนเตา	rpm
B	ค่าที่ขึ้นกับวัสดุโดยคำนวณจาก $B = 5(D_p)^{-0.5}$	-
D_p	ขนาดของวัสดุ	μm
G	อัตราการไหลของอากาศ	lb/hr.ft ²
F	อัตราการป้อน	lb/hr.ft ²
S_{lift}	พื้นที่ภายในเตาเผาแบบหมุนโดยไม่รวมพื้นที่วัสดุบนใบกวน	m ²
N_{lift}	จำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน	-
S_{horlift}	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุบนใบกวน	m ²
A_w	พื้นที่มุมสามเหลี่ยม OAE	m ²
A_{11}	พื้นที่มุมสามเหลี่ยม FDC	m ²
A_{12}	พื้นที่มุมสามเหลี่ยม OAF	m ²
γ	dynamic angle of repose	rad
ε^*	auxiliary filling angle	rad
φ	auxiliary coordinate	rad
R	รัศมีของเตาเผาแบบหมุน	m
l_2	ความกว้างของใบกวน	m
r_{HS}	ระยะจากจุดศูนย์กลางเตาเผาแบบหมุนถึงปลายของใบกวน	m
r_{H}	ระยะจากจุดศูนย์กลางเตาเผาแบบหมุนถึงใบกวน	m
κ	auxiliary coordinate	rad
δ	มุมที่วัสดุเริ่มตกลงจากใบกวนโดยจะมีค่าเท่ากับมุมรีโพลของวัสดุ	rad
α	มุมของใบกวน	rad
Y_{solid}	ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	%
Y_{liquid}	ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	%
Y_{gas}	ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแก๊สหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	%
m_{solid}	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	kg
m_{liquid}	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	kg
m_{total}	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	kg
S	น้ำหนักของชีวมวลที่อยู่บนชั้นตะแกรงแต่ละช่วงขนาด	g

W_t	น้ำหนักรวมทั้งหมดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	g
Y_m	ผลได้เชิงมวล	%
Y_e	ผลได้เชิงพลังงาน	%
M_t	มวลของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน	kg
M_r	มวลของชีวมวลดิบก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน	kg
HHV_t	ค่าความร้อนของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน	MJ/kg
HHV_r	ค่าความร้อนของชีวมวลดิบก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน	MJ/kg



รายการอ้างอิง

- [1] L.J.R. Nunes, T.P. Causer, D. Ciolkosz, Biomass for energy : A review on supply chain management models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120 (2020) 109658-109658.
- [2] F. Sher, S.Z. Iqbal, H. Liu, M. Imran, C.E. Snape, Thermal and kinetic analysis of diverse biomass fuels under different reaction environment : A way forward to renewable energy sources, *Energy Conversion and Management*, (2019) 112266-112266.
- [3] B. Acharya, I. Sule, A. Dutta, A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2 (2012) 349-369.
- [4] J.S. Tumuluru, C. Wright, R. Boardman, J. Hess, S. Sokhansanj, Review on Biomass Torrefaction Process and Product properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development, 2011.
- [5] Boateng, Rotary kilns - transport phenomena and transport processes, 1 (2006).
- [6] A. Gunnarsson, K. Andersson, B.R. Adams, C. Fredriksson, International Journal of Heat and Mass Transfer Full-scale 3D-modelling of the radiative heat transfer in rotary kilns with a present bed material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (2019) 118924-118924.
- [7] S.V. Vassilev, C.G. Vassileva, V.S. Vassilev, Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal : An overview, *FUEL*, (2015).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] M. Phanphanich, S. Mani, Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass, *Bioresource Technology*, 102 (2011) 1246-1253.
- [11] 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.

[12] X. Tian, L. Dai, Y. Wang, Z. Zeng, S. Zhang, L. Jiang, X. Yang, L. Yue, Y. Liu, R. Ruan, State Key Laboratory of Food Science and Technology, Engineering Research Center for Biomass b Center, Bioresource Technology, (2019) 122490-122490.

[13] D. Chen, A. Gao, Z. Ma, D. Fei, Y. Chang, C. Shen, In-depth study of rice husk torrefaction: Characterization of solid, liquid and gaseous products, oxygen migration and energy yield, *Bioresource Technology*, 253 (2018) 148-153.

[14] S.X. Li, C.Z. Chen, M.F. Li, X. Xiao, Torrefaction of corncob to produce charcoal under nitrogen and carbon dioxide atmospheres, *Bioresource Technology*, 249 (2018) 348-353.

[15] N. Saponpongpiat, D. Sittikul, P. Comsawang, Prediction model of higher heating value of torrefied biomass based on the kinetics of biomass decomposition, *Journal of the Energy Institute*, 89 (2016) 425-435.

[16] N. Tharawadee, Effects of torrefaction process on physical properties and operating cost of biomass powder, (2015).

[17] M. Erol, H. Haykiri-Acma, S. Küçükbayrak, Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data, *Renewable Energy*, 35 (2010) 170-173.

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

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

[20] A.S.B. Njeng, S. Vitu, M. Clause, J. 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. Clause, 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. Choi, Lifter design for enhanced heat transfer in a rotary kiln reactor, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27 (2013) 3191-3197.

- [23] 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, *Bioresour Technol*, 177 (2015) 355-360.
- [24] B. Colin, J.L. Dirion, P. Arlabosse, S. Salvador, Experimental study of wood chips torrefaction in a pilot scale rotary kiln, *Chemical Engineering Transactions*, 37 (2014) 505-510.
- [25] J.S. Tumuluru, S. Sokhansanj, J. Hess, C. Wright, R. Boardman, A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties for Energy Applications, *Industrial Biotechnology*, 7 (2011) 384-401.
- [26] D. Medic, M. Darr, A. Shah, B. Potter, J. Zimmerman, Effect of Torrefaction Process Parameters on Biomass Feedstock Upgrading, *FUEL*, 91 (2012) 147-154.
- [27] X. Liu, S. Eckehard, Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns, *Chemical Engineering Science*, (2006) 5176-5181.
- [28] น.พ.น. ชูเที่ยงฉิน, น. ดิสเสถียร, สมการสหสัมพันธ์ของระยะเวลาของเตาเผาชีวมวลทอริไฟร์แบบหมุน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร, (2018).
- [29] น. เคลือบแก้ว, น. หิตพัฒน์, การศึกษาระยะเวลาการดำเนินการเฉลี่ย และอิทธิพลของใบกวน ที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินการเฉลี่ยของเตาเผาแบบหมุน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร, (2018).
- [30] G. Ciulla, A.D. Amico, V.L. Brano, Evaluation of building heating loads with dimensional analysis : Application of the Buckingham theorem, *Energy & Buildings*, 154 (2017) 479-490.
- [31] P. Polverino, G. Bove, M. Sorrentino, C. Pianese, D. Beretta, Advancements on scaling-up simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells impedance through Buckingham Pi theorem, *Applied Energy*, 249 (2019) 245-252.
- [32] D.S. John, G.M. Charles, C.O. Ralston, Passage of solid particles through rotary cylindrical kilns, (1927).
- [33] A. Chatterjee, A.V. Sathe, M.P. Srivastava, P.K. Mukhopadhyay, Flow of Materials in Rotary Kilns Used for Sponge Iron Manufacture: Part I. Effect of Some Operational Variables, 14 (1983).
- [34] A. Chatterjee, A.V. Sathe, R.K. Mukhopadhyay, Flow of Materials in Rotary Kilns Used for Sponge Iron Manufacture : Part II . Effect of Kiln Geometry, 14 (1983) 383-392.
- [35] W.C. SEAMAN, Passage of solids through rotary kilns: factors affecting time of

passage, *Chemical Engineering Progress*, 47 (1951) 508–514.

[36] K.R. Sunkara, F. Herz, E. Specht, J. Mellmann, R. Erpelding, Modeling the discharge characteristics of rectangular flights in a flighted rotary drum, *Powder Technology*, 234 (2013) 107-116.

[37] 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.

[38] D. Chen, F. Chen, K. Cen, X. Cao, J. Zhang, J. Zhou, Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction, *FUEL*, 275 (2020) 117936-117936.

[39] S. Zhang, Y. Su, K. Ding, S. Zhu, H. Zhang, X. Liu, Y. Xiong, Effect of inorganic species on torrefaction process and product properties of rice husk, *Bioresource Technology*, 265 (2018) 450-455.

[40] M. Asadullah, A.M. Adi, N. Suhada, N.H. Malek, M.I. Saringat, A. Azdarpour, Optimization of palm kernel shell torrefaction to produce energy densified bio-coal, *Energy Conversion and Management*, (2014).

[41] R. Junga, J. Pospolita, P. Niemiec, Combustion and grindability characteristics of palm kernel shells torrefied in a pilot-scale installation, *Renewable Energy*, 147 (2020) 1239-1250.

[42] N. Soponpongpiat, S. Nanetoe, P. Comsawang, Thermal degradation of cassava rhizome in thermosyphon-fixed bed torrefaction reactor, *Processes*, 8 (2020).

[43] N. Soponpongpiat, S. Nanetoe, P. Comsawang, Thermal and torrefaction characteristics of a small-scale rotating drum reactor, *Processes*, 8 (2020).

[44] T. Haeldermans, M.A. Lataf, G. Vanroelen, P. Samyn, D. Vandamme, A. Cuypers, K. Vanreppelen, S. Schreurs, Numerical prediction of the mean residence time of solid materials in a pilot-scale rotary kiln, *Powder Technology*, 354 (2019) 392-401.

[45] W.Z. Chen, C.H. Wang, T. Liu, C.Y. Zuo, Y.H. Tian, T.T. Gao, Residence time and mass flow rate of particles in carbon rotary kilns, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48 (2009) 955-960.





ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ตาราง ก.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

sieve size (mm)	raw material	temperature (°C)		
		230	250	270
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	4.61	2.20	3.12
1.7 - 3.35	48.45	59.07	49.78	61.69
0.85 - 1.7	14.74	20.94	25.16	25.01
0.6 - 0.85	3.81	3.15	5.10	3.04
0.425 - 0.6	3.51	2.22	3.88	1.75
0.3 - 0.425	3.11	2.02	3.06	1.12
0.212 - 0.3	2.51	1.85	2.46	1.05
0.15 - 0.212	2.91	2.05	2.79	1.08
0.106 - 0.15	2.01	1.39	1.93	0.69
0.075 - 0.106	2.01	0.99	1.44	0.53
0.053 - 0.075	1.71	0.36	0.49	0.23
<0.053	2.61	1.36	1.71	0.69

ตาราง ก.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

sieve size (mm)	raw material	temperature (°C)		
		230	250	270
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	3.73	2.39	1.53
1.7 - 3.35	48.45	50.62	49.45	41.32
0.85 - 1.7	14.74	23.00	26.92	31.48
0.6 - 0.85	3.81	4.63	4.54	5.08
0.425 - 0.6	3.51	3.48	3.65	3.85
0.3 - 0.425	3.11	2.86	3.05	3.32
0.212 - 0.3	2.51	2.40	2.45	2.83
0.15 - 0.212	2.91	2.95	2.75	3.47
0.106 - 0.15	2.01	2.20	1.66	2.44
0.075 - 0.106	2.01	1.90	1.23	2.03
0.053 - 0.075	1.71	0.46	0.53	0.62
<0.053	2.61	1.77	1.39	2.02

ตาราง ก.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที

sieve size (mm)	raw material	temperature (°C)		
		230	250	270
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	2.43	2.09	2.43
1.7 - 3.35	48.45	58.17	44.73	58.17
0.85 - 1.7	14.74	28.59	28.44	28.59
0.6 - 0.85	3.81	4.17	6.66	4.17
0.425 - 0.6	3.51	2.27	4.64	2.27
0.3 - 0.425	3.11	1.33	3.45	1.33
0.212 - 0.3	2.51	0.73	2.45	0.73
0.15 - 0.212	2.91	0.70	2.55	0.70
0.106 - 0.15	2.01	0.40	1.79	0.40
0.075 - 0.106	2.01	0.30	1.39	0.30
0.053 - 0.075	1.71	0.07	0.50	0.07
<0.053	2.61	0.83	1.29	0.83

ตาราง ก.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

sieve size (mm)	raw material	Rotational speed (rpm)		
		1	2	3
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	4.61	3.73	2.43
1.7 - 3.35	48.45	59.07	50.62	58.17
0.85 - 1.7	14.74	20.94	23.00	28.59
0.6 - 0.85	3.81	3.15	4.63	4.17
0.425 - 0.6	3.51	2.22	3.48	2.27
0.3 - 0.425	3.11	2.02	2.86	1.33
0.212 - 0.3	2.51	1.85	2.40	0.73
0.15 - 0.212	2.91	2.05	2.95	0.70
0.106 - 0.15	2.01	1.39	2.20	0.40
0.075 - 0.106	2.01	0.99	1.90	0.30
0.053 - 0.075	1.71	0.36	0.46	0.07
<0.053	2.61	1.36	1.77	0.83

ตาราง ก.5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

sieve size (mm)	raw material	Rotational speed (rpm)		
		1	2	3
	(%)	(%)	(%)	(%)
3.35 <	12.64	2.20	2.39	2.09
1.7 - 3.35	48.45	49.78	49.45	44.73
0.85 - 1.7	14.74	25.16	26.92	28.44
0.6 - 0.85	3.81	5.10	4.54	6.66
0.425 - 0.6	3.51	3.88	3.65	4.64
0.3 - 0.425	3.11	3.06	3.05	3.45
0.212 - 0.3	2.51	2.46	2.45	2.45
0.15 - 0.212	2.91	2.79	2.75	2.55
0.106 - 0.15	2.01	1.93	1.66	1.79
0.075 - 0.106	2.01	1.44	1.23	1.39
0.053 - 0.075	1.71	0.49	0.53	0.50
<0.053	2.61	1.71	1.39	1.29

ตาราง ก.6 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกะลาปาล์มทอริไฟร์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

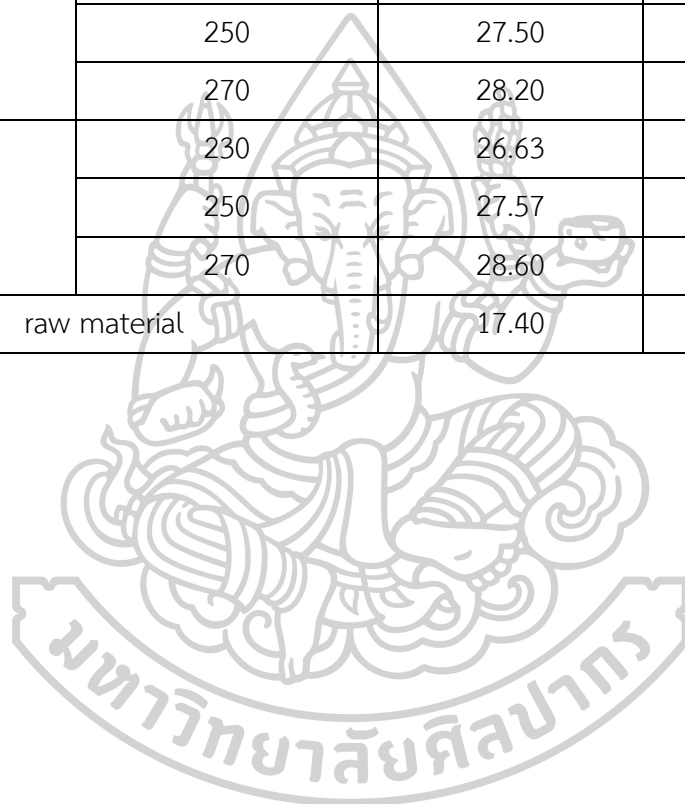
sieve size (mm)	raw material (%)	Rotational speed (rpm)		
		1 (%)	2 (%)	3 (%)
3.35 <	12.64	3.12	1.53	2.43
1.7 - 3.35	48.45	61.69	41.32	58.17
0.85 - 1.7	14.74	25.01	31.48	28.59
0.6 - 0.85	3.81	3.04	5.08	4.17
0.425 - 0.6	3.51	1.75	3.85	2.27
0.3 - 0.425	3.11	1.12	3.32	1.33
0.212 - 0.3	2.51	1.05	2.83	0.73
0.15 - 0.212	2.91	1.08	3.47	0.70
0.106 - 0.15	2.01	0.69	2.44	0.40
0.075 - 0.106	2.01	0.53	2.03	0.30
0.053 - 0.075	1.71	0.23	0.62	0.07
<0.053	2.61	0.69	2.02	0.83

ตาราง ก.7 ผลได้ของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน

temperature (degree Celsius)	yield (%)		
	Solid phase (bio-coal)	Liquid phase	Gas phase (non-condensable gas)
230	77.60	14.20	8.20
250	65.67	22.93	11.40
270	54.10	29.87	16.03

ตาราง ก.8 ค่าความร้อนก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

rotational speed (rpm)	Temperature (degree Celsius)	HHV (MJ/kg)	energy yield (%)
1	230	25.53	61.27
	250	26.27	55.82
	270	25.40	44.64
2	230	25.53	65.45
	250	27.50	59.90
	270	28.20	57.51
3	230	26.63	71.51
	250	27.57	66.72
	270	28.60	60.10
raw material		17.40	-





ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	1	1	30	0.00079	0	55.6
6	0.3	1	1	30	0.00079	0	55.38
6	0.3	1	1	30	0.00079	0	55.35
6	0.3	1	1	30	0.00311	0	51.26
6	0.3	1	1	30	0.00311	0	51.63
6	0.3	1	1	30	0.00311	0	51.96
6	0.3	1	1	30	0.00523	0	48.86
6	0.3	1	1	30	0.00523	0	49.3
6	0.3	1	1	30	0.00523	0	49.18
6	0.3	2	1	30	0.00079	0	36.25
6	0.3	2	1	30	0.00079	0	36.13
6	0.3	2	1	30	0.00079	0	36.18
6	0.3	2	1	30	0.00311	0	31.68
6	0.3	2	1	30	0.00311	0	31.61
6	0.3	2	1	30	0.00311	0	31.65
6	0.3	2	1	30	0.00523	0	28.66
6	0.3	2	1	30	0.00523	0	28.58
6	0.3	2	1	30	0.00523	0	28.4
6	0.3	3	1	30	0.00079	0	27.2
6	0.3	3	1	30	0.00079	0	27.8
6	0.3	3	1	30	0.00079	0	27.71
6	0.3	3	1	30	0.00311	0	23.76
6	0.3	3	1	30	0.00311	0	23.63
6	0.3	3	1	30	0.00311	0	23.58
6	0.3	3	1	30	0.00523	0	21.81
6	0.3	3	1	30	0.00523	0	21.36

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	1	30	0.00523	0	21.5
6	0.3	1	3	30	0.000825	0	36.06
6	0.3	1	3	30	0.000825	0	36.26
6	0.3	1	3	30	0.000825	0	36.16
6	0.3	1	3	30	0.00318	0	33.81
6	0.3	1	3	30	0.00318	0	34.2
6	0.3	1	3	30	0.00318	0	33.68
6	0.3	1	3	30	0.00531	0	31.66
6	0.3	1	3	30	0.00531	0	31.25
6	0.3	1	3	30	0.00531	0	31.38
6	0.3	2	3	30	0.000825	0	19.28
6	0.3	2	3	30	0.000825	0	19.5
6	0.3	2	3	30	0.000825	0	19.4
6	0.3	2	3	30	0.00318	0	18.68
6	0.3	2	3	30	0.00318	0	18.56
6	0.3	2	3	30	0.00318	0	18.43
6	0.3	2	3	30	0.00531	0	17.45
6	0.3	2	3	30	0.00531	0	17.13
6	0.3	2	3	30	0.00531	0	17.21
6	0.3	3	3	30	0.000825	0	14.1
6	0.3	3	3	30	0.000825	0	14.2
6	0.3	3	3	30	0.000825	0	14.35
6	0.3	3	3	30	0.00318	0	12.93
6	0.3	3	3	30	0.00318	0	13
6	0.3	3	3	30	0.00318	0	12.95
6	0.3	3	3	30	0.00531	0	12.36

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	3	30	0.00531	0	12.35
6	0.3	3	3	30	0.00531	0	12.33
6	0.3	1	5	30	0.000871	0	25.18
6	0.3	1	5	30	0.000871	0	24.83
6	0.3	1	5	30	0.000871	0	25.01
6	0.3	1	5	30	0.00326	0	24.08
6	0.3	1	5	30	0.00326	0	23.91
6	0.3	1	5	30	0.00326	0	23.83
6	0.3	1	5	30	0.00542	0	22.73
6	0.3	1	5	30	0.00542	0	22.98
6	0.3	1	5	30	0.00542	0	22.91
6	0.3	2	5	30	0.000871	0	14.05
6	0.3	2	5	30	0.000871	0	13.91
6	0.3	2	5	30	0.000871	0	14
6	0.3	2	5	30	0.00326	0	13.08
6	0.3	2	5	30	0.00326	0	13.03
6	0.3	2	5	30	0.00326	0	13
6	0.3	2	5	30	0.00542	0	12.58
6	0.3	2	5	30	0.00542	0	12.51
6	0.3	2	5	30	0.00542	0	12.43
6	0.3	3	5	30	0.000871	0	9.83
6	0.3	3	5	30	0.000871	0	10.05
6	0.3	3	5	30	0.000871	0	9.93
6	0.3	3	5	30	0.00326	0	9.41
6	0.3	3	5	30	0.00326	0	9.25
6	0.3	3	5	30	0.00326	0	9.33

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	5	30	0.00542	0	9.23
6	0.3	3	5	30	0.00542	0	9.1
6	0.3	3	5	30	0.00542	0	9.08
6	0.3	1	1	30	0.00078951	1	69.61
6	0.3	1	1	30	0.00078951	1	69.7
6	0.3	1	1	30	0.00078951	1	69.9
6	0.3	1	1	30	0.00311	1	64.76
6	0.3	1	1	30	0.00311	1	64.6
6	0.3	1	1	30	0.00311	1	64.43
6	0.3	1	1	30	0.00523	1	61.18
6	0.3	1	1	30	0.00523	1	61.43
6	0.3	1	1	30	0.00523	1	61.3
6	0.3	2	1	30	0.00078951	1	41.96
6	0.3	2	1	30	0.00078951	1	42.08
6	0.3	2	1	30	0.00078951	1	41.3
6	0.3	2	1	30	0.00311	1	38.95
6	0.3	2	1	30	0.00311	1	38.76
6	0.3	2	1	30	0.00311	1	38.86
6	0.3	2	1	30	0.00523	1	35.53
6	0.3	2	1	30	0.00523	1	35.33
6	0.3	2	1	30	0.00523	1	35.3
6	0.3	3	1	30	0.00078951	1	30.61
6	0.3	3	1	30	0.00078951	1	30.9
6	0.3	3	1	30	0.00078951	1	30.71
6	0.3	3	1	30	0.00311	1	27.94
6	0.3	3	1	30	0.00311	1	27.73

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	1	30	0.00311	1	27.91
6	0.3	3	1	30	0.00523	1	25.41
6	0.3	3	1	30	0.00523	1	25.5
6	0.3	3	1	30	0.00523	1	25.3
6	0.3	1	3	30	0.000825	1	39.33
6	0.3	1	3	30	0.000825	1	38.83
6	0.3	1	3	30	0.000825	1	39.16
6	0.3	1	3	30	0.00318	1	35.8
6	0.3	1	3	30	0.00318	1	35.7
6	0.3	1	3	30	0.00318	1	35.66
6	0.3	1	3	30	0.00531	1	33.16
6	0.3	1	3	30	0.00531	1	33.58
6	0.3	1	3	30	0.00531	1	33.41
6	0.3	2	3	30	0.000825	1	22.18
6	0.3	2	3	30	0.000825	1	22.53
6	0.3	2	3	30	0.000825	1	21.98
6	0.3	2	3	30	0.00318	1	20.25
6	0.3	2	3	30	0.00318	1	20.55
6	0.3	2	3	30	0.00318	1	20.43
6	0.3	2	3	30	0.00531	1	18.86
6	0.3	2	3	30	0.00531	1	18.66
6	0.3	2	3	30	0.00531	1	18.85
6	0.3	3	3	30	0.000825	1	16.96
6	0.3	3	3	30	0.000825	1	16.61
6	0.3	3	3	30	0.000825	1	16.78
6	0.3	3	3	30	0.00318	1	15.68

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	3	30	0.00318	1	15.73
6	0.3	3	3	30	0.00318	1	14.8
6	0.3	3	3	30	0.00531	1	13.76
6	0.3	3	3	30	0.00531	1	13.86
6	0.3	3	3	30	0.00531	1	13.91
6	0.3	1	5	30	0.000871	1	30.05
6	0.3	1	5	30	0.000871	1	30.5
6	0.3	1	5	30	0.000871	1	30.18
6	0.3	1	5	30	0.00326	1	26.15
6	0.3	1	5	30	0.00326	1	26.3
6	0.3	1	5	30	0.00326	1	26.08
6	0.3	1	5	30	0.00542	1	24.01
6	0.3	1	5	30	0.00542	1	23.86
6	0.3	1	5	30	0.00542	1	24.16
6	0.3	2	5	30	0.000871	1	15.26
6	0.3	2	5	30	0.000871	1	15.41
6	0.3	2	5	30	0.000871	1	15.1
6	0.3	2	5	30	0.00326	1	14.13
6	0.3	2	5	30	0.00326	1	14.18
6	0.3	2	5	30	0.00326	1	14.23
6	0.3	2	5	30	0.00542	1	13.58
6	0.3	2	5	30	0.00542	1	13.21
6	0.3	2	5	30	0.00542	1	13.38
6	0.3	3	5	30	0.000871	1	11.33
6	0.3	3	5	30	0.000871	1	11.83
6	0.3	3	5	30	0.000871	1	11.15

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	5	30	0.00326	1	10.08
6	0.3	3	5	30	0.00326	1	10.28
6	0.3	3	5	30	0.00326	1	10.3
6	0.3	3	5	30	0.00542	1	9.51
6	0.3	3	5	30	0.00542	1	9.65
6	0.3	3	5	30	0.00542	1	9.6
6	0.3	1	1	30	0.00078951	2	87.18
6	0.3	1	1	30	0.00078951	2	87.03
6	0.3	1	1	30	0.00078951	2	86.62
6	0.3	1	1	30	0.00311	2	72.23
6	0.3	1	1	30	0.00311	2	72.53
6	0.3	1	1	30	0.00311	2	72.41
6	0.3	1	1	30	0.00523	2	56.7
6	0.3	1	1	30	0.00523	2	56.49
6	0.3	1	1	30	0.00523	2	55.43
6	0.3	2	1	30	0.00078951	2	48.8
6	0.3	2	1	30	0.00078951	2	49.57
6	0.3	2	1	30	0.00078951	2	48.65
6	0.3	2	1	30	0.00311	2	42.48
6	0.3	2	1	30	0.00311	2	42.26
6	0.3	2	1	30	0.00311	2	42.08
6	0.3	2	1	30	0.00523	2	39.41
6	0.3	2	1	30	0.00523	2	39.23
6	0.3	2	1	30	0.00523	2	39.33
6	0.3	3	1	30	0.00078951	2	37.85
6	0.3	3	1	30	0.00078951	2	38.3

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	1	30	0.00078951	2	39.78
6	0.3	3	1	30	0.00311	2	32.33
6	0.3	3	1	30	0.00311	2	32.1
6	0.3	3	1	30	0.00311	2	32.25
6	0.3	3	1	30	0.00523	2	29.56
6	0.3	3	1	30	0.00523	2	29.48
6	0.3	3	1	30	0.00523	2	29.73
6	0.3	1	3	30	0.000825	2	41.75
6	0.3	1	3	30	0.000825	2	41.4
6	0.3	1	3	30	0.000825	2	41.22
6	0.3	1	3	30	0.00318	2	38.01
6	0.3	1	3	30	0.00318	2	38.28
6	0.3	1	3	30	0.00318	2	38.15
6	0.3	1	3	30	0.00531	2	36.58
6	0.3	1	3	30	0.00531	2	36.36
6	0.3	1	3	30	0.00531	2	36.46
6	0.3	2	3	30	0.000825	2	25.75
6	0.3	2	3	30	0.000825	2	25.18
6	0.3	2	3	30	0.000825	2	25.42
6	0.3	2	3	30	0.00318	2	22.33
6	0.3	2	3	30	0.00318	2	22.4
6	0.3	2	3	30	0.00318	2	22.26
6	0.3	2	3	30	0.00531	2	21.01
6	0.3	2	3	30	0.00531	2	21.2
6	0.3	2	3	30	0.00531	2	21.3
6	0.3	3	3	30	0.000825	2	25.75

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	3	30	0.000825	2	25.18
6	0.3	3	3	30	0.000825	2	25.42
6	0.3	3	3	30	0.00318	2	15.58
6	0.3	3	3	30	0.00318	2	15.4
6	0.3	3	3	30	0.00318	2	15.45
6	0.3	3	3	30	0.00531	2	14.38
6	0.3	3	3	30	0.00531	2	14.5
6	0.3	3	3	30	0.00531	2	14.41
6	0.3	1	5	30	0.000871	2	32.42
6	0.3	1	5	30	0.000871	2	31.52
6	0.3	1	5	30	0.000871	2	32.95
6	0.3	1	5	30	0.00326	2	29.16
6	0.3	1	5	30	0.00326	2	28.91
6	0.3	1	5	30	0.00326	2	29.01
6	0.3	1	5	30	0.00542	2	27.36
6	0.3	1	5	30	0.00542	2	27.31
6	0.3	1	5	30	0.00542	2	27.5
6	0.3	2	5	30	0.000871	2	17.32
6	0.3	2	5	30	0.000871	2	17.82
6	0.3	2	5	30	0.000871	2	17.9
6	0.3	2	5	30	0.00326	2	15.91
6	0.3	2	5	30	0.00326	2	15.78
6	0.3	2	5	30	0.00326	2	15.76
6	0.3	2	5	30	0.00542	2	14.83
6	0.3	2	5	30	0.00542	2	14.96
6	0.3	2	5	30	0.00542	2	14.75

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	5	30	0.000871	2	12.72
6	0.3	3	5	30	0.000871	2	13.27
6	0.3	3	5	30	0.000871	2	12.98
6	0.3	3	5	30	0.00326	2	12.08
6	0.3	3	5	30	0.00326	2	11.93
6	0.3	3	5	30	0.00326	2	11.73
6	0.3	3	5	30	0.00542	2	10.78
6	0.3	3	5	30	0.00542	2	10.91
6	0.3	3	5	30	0.00542	2	10.66
6	0.3	1	1	30	0.000482502	0	66.45
6	0.3	1	1	30	0.000482502	0	66.14
6	0.3	1	1	30	0.000482502	0	66.13
6	0.3	2	1	30	0.000482502	0	37.58
6	0.3	2	1	30	0.000482502	0	37.29
6	0.3	2	1	30	0.000482502	0	37.27
6	0.3	3	1	30	0.000482502	0	27.32
6	0.3	3	1	30	0.000482502	0	27.21
6	0.3	3	1	30	0.000482502	0	27.48
6	0.3	1	3	30	0.000519424	0	35.44
6	0.3	1	3	30	0.000519424	0	35.34
6	0.3	1	3	30	0.000519424	0	35.55
6	0.3	2	3	30	0.000519424	0	19.46
6	0.3	2	3	30	0.000519424	0	19.38
6	0.3	2	3	30	0.000519424	0	19.42
6	0.3	3	3	30	0.000519424	0	14.3
6	0.3	3	3	30	0.000519424	0	14.52

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	3	30	0.000519424	0	14.46
6	0.3	1	5	30	0.000558863	0	26.02
6	0.3	1	5	30	0.000558863	0	25.52
6	0.3	1	5	30	0.000558863	0	25.4
6	0.3	2	5	30	0.000558863	0	13.3
6	0.3	2	5	30	0.000558863	0	13.42
6	0.3	2	5	30	0.000558863	0	14.14
6	0.3	3	5	30	0.000558863	0	9.4
6	0.3	3	5	30	0.000558863	0	9.5
6	0.3	3	5	30	0.000558863	0	9.33
6	0.3	1	1	30	0.000482502	1	73.34
6	0.3	1	1	30	0.000482502	1	73.43
6	0.3	1	1	30	0.000482502	1	73.59
6	0.3	2	1	30	0.000482502	1	42.44
6	0.3	2	1	30	0.000482502	1	42.28
6	0.3	2	1	30	0.000482502	1	42.32
6	0.3	3	1	30	0.000482502	1	30.38
6	0.3	3	1	30	0.000482502	1	30.36
6	0.3	3	1	30	0.000482502	1	30.31
6	0.3	1	3	30	0.000519424	1	41.32
6	0.3	1	3	30	0.000519424	1	41.49
6	0.3	1	3	30	0.000519424	1	41.41
6	0.3	2	3	30	0.000519424	1	22.21
6	0.3	2	3	30	0.000519424	1	22.07
6	0.3	2	3	30	0.000519424	1	22.32
6	0.3	3	3	30	0.000519424	1	16.13

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	3	30	0.000519424	1	16.23
6	0.3	3	3	30	0.000519424	1	16.27
6	0.3	1	5	30	0.000558863	1	29.45
6	0.3	1	5	30	0.000558863	1	29.32
6	0.3	1	5	30	0.000558863	1	29.38
6	0.3	2	5	30	0.000558863	1	14.32
6	0.3	2	5	30	0.000558863	1	14.42
6	0.3	2	5	30	0.000558863	1	14.28
6	0.3	3	5	30	0.000558863	1	10.29
6	0.3	3	5	30	0.000558863	1	10.44
6	0.3	3	5	30	0.000558863	1	10.36
6	0.3	1	1	30	0.000482502	2	81.9
6	0.3	1	1	30	0.000482502	2	82.15
6	0.3	1	1	30	0.000482502	2	80.48
6	0.3	2	1	30	0.000482502	2	47.56
6	0.3	2	1	30	0.000482502	2	48.05
6	0.3	2	1	30	0.000482502	2	47.81
6	0.3	3	1	30	0.000482502	2	33.1
6	0.3	3	1	30	0.000482502	2	32.45
6	0.3	3	1	30	0.000482502	2	34.26
6	0.3	1	3	30	0.000519424	2	46.3
6	0.3	1	3	30	0.000519424	2	44.93
6	0.3	1	3	30	0.000519424	2	45.55
6	0.3	2	3	30	0.000519424	2	26.85
6	0.3	2	3	30	0.000519424	2	26.67
6	0.3	2	3	30	0.000519424	2	25.88

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	3	3	30	0.000519424	2	18.65
6	0.3	3	3	30	0.000519424	2	18.78
6	0.3	3	3	30	0.000519424	2	18.58
6	0.3	1	5	30	0.000558863	2	33.3
6	0.3	1	5	30	0.000558863	2	33.48
6	0.3	1	5	30	0.000558863	2	32.88
6	0.3	2	5	30	0.000558863	2	15.98
6	0.3	2	5	30	0.000558863	2	16.35
6	0.3	2	5	30	0.000558863	2	16.88
6	0.3	3	5	30	0.000558863	2	11.28
6	0.3	3	5	30	0.000558863	2	11.65
6	0.3	3	5	30	0.000558863	2	11.78
6	0.3	1	1	30	0.000497583	0	64.01
6	0.3	1	1	30	0.000497583	0	64.22
6	0.3	1	1	30	0.000497583	0	64.16
6	0.3	2	1	30	0.000497583	0	36.31
6	0.3	2	1	30	0.000497583	0	36.34
6	0.3	2	1	30	0.000497583	0	36.4
6	0.3	3	1	30	0.000497583	0	26.33
6	0.3	3	1	30	0.000497583	0	26.2
6	0.3	3	1	30	0.000497583	0	26.4
6	0.3	1	3	30	0.000536035	0	37.2
6	0.3	1	3	30	0.000536035	0	37.3
6	0.3	1	3	30	0.000536035	0	37.27
6	0.3	2	3	30	0.000536035	0	20.29
6	0.3	2	3	30	0.000536035	0	20.24

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	2	3	30	0.000536035	0	20.3
6	0.3	3	3	30	0.000536035	0	15.54
6	0.3	3	3	30	0.000536035	0	15.51
6	0.3	3	3	30	0.000536035	0	15.58
6	0.3	1	5	30	0.000624415	0	27.3
6	0.3	1	5	30	0.000624415	0	27.38
6	0.3	1	5	30	0.000624415	0	27.4
6	0.3	2	5	30	0.000624415	0	14.35
6	0.3	2	5	30	0.000624415	0	14.3
6	0.3	2	5	30	0.000624415	0	14.25
6	0.3	3	5	30	0.000624415	0	10.02
6	0.3	3	5	30	0.000624415	0	9.58
6	0.3	3	5	30	0.000624415	0	10.05
6	0.3	1	1	30	0.000497583	1	82.18
6	0.3	1	1	30	0.000497583	1	82.43
6	0.3	1	1	30	0.000497583	1	82.29
6	0.3	2	1	30	0.000497583	1	46.25
6	0.3	2	1	30	0.000497583	1	46.33
6	0.3	2	1	30	0.000497583	1	46.4
6	0.3	3	1	30	0.000497583	1	36.55
6	0.3	3	1	30	0.000497583	1	36.43
6	0.3	3	1	30	0.000497583	1	36.49
6	0.3	1	3	30	0.000536035	1	45.35
6	0.3	1	3	30	0.000536035	1	45.45
6	0.3	1	3	30	0.000536035	1	45.39
6	0.3	2	3	30	0.000536035	1	26.4

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	2	3	30	0.000536035	1	26.36
6	0.3	2	3	30	0.000536035	1	26.54
6	0.3	3	3	30	0.000536035	1	20.08
6	0.3	3	3	30	0.000536035	1	20.04
6	0.3	3	3	30	0.000536035	1	20.1
6	0.3	1	5	30	0.000624415	1	35.53
6	0.3	1	5	30	0.000624415	1	35.35
6	0.3	1	5	30	0.000624415	1	35.2
6	0.3	2	5	30	0.000624415	1	18.32
6	0.3	2	5	30	0.000624415	1	18.22
6	0.3	2	5	30	0.000624415	1	18.25
6	0.3	3	5	30	0.000624415	1	13.29
6	0.3	3	5	30	0.000624415	1	13.41
6	0.3	3	5	30	0.000624415	1	13.32
6	0.3	1	1	30	0.000497583	2	99.45
6	0.3	1	1	30	0.000497583	2	100.81
6	0.3	1	1	30	0.000497583	2	99.93
6	0.3	2	1	30	0.000497583	2	56.46
6	0.3	2	1	30	0.000497583	2	55.95
6	0.3	2	1	30	0.000497583	2	56.366
6	0.3	3	1	30	0.000497583	2	46.46
6	0.3	3	1	30	0.000497583	2	46.38
6	0.3	3	1	30	0.000497583	2	46.18
6	0.3	1	3	30	0.000536035	2	54.43
6	0.3	1	3	30	0.000536035	2	54.35
6	0.3	1	3	30	0.000536035	2	54.95

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	2	3	30	0.000536035	2	32.4
6	0.3	2	3	30	0.000536035	2	32.23
6	0.3	2	3	30	0.000536035	2	31.55
6	0.3	3	3	30	0.000536035	2	26.96
6	0.3	3	3	30	0.000536035	2	25.51
6	0.3	3	3	30	0.000536035	2	25.63
6	0.3	1	5	30	0.000624415	2	45.08
6	0.3	1	5	30	0.000624415	2	44.78
6	0.3	1	5	30	0.000624415	2	45.18
6	0.3	2	5	30	0.000624415	2	25.25
6	0.3	2	5	30	0.000624415	2	25.88
6	0.3	2	5	30	0.000624415	2	25.76
6	0.3	3	5	30	0.000624415	2	17.46
6	0.3	3	5	30	0.000624415	2	17.51
6	0.3	3	5	30	0.000624415	2	17.58
6	0.3	1	1	30	0.000497583	0	69.35
6	0.3	1	1	30	0.000497583	0	69.55
6	0.3	1	1	30	0.000497583	0	69.43
6	0.3	2	1	30	0.000497583	0	38.33
6	0.3	2	1	30	0.000497583	0	38.4
6	0.3	2	1	30	0.000497583	0	38.38
6	0.3	3	1	30	0.000497583	0	28.3
6	0.3	3	1	30	0.000497583	0	28.2
6	0.3	3	1	30	0.000497583	0	28.17
6	0.3	1	3	30	0.000536035	0	37.4
6	0.3	1	3	30	0.000536035	0	37.37

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	1	3	30	0.000536035	0	37.34
6	0.3	2	3	30	0.000536035	0	20.24
6	0.3	2	3	30	0.000536035	0	20.28
6	0.3	2	3	30	0.000536035	0	20.27
6	0.3	3	3	30	0.000536035	0	14.31
6	0.3	3	3	30	0.000536035	0	14.35
6	0.3	3	3	30	0.000536035	0	14.3
6	0.3	1	5	30	0.000624415	0	26.48
6	0.3	1	5	30	0.000624415	0	26.55
6	0.3	1	5	30	0.000624415	0	26.5
6	0.3	2	5	30	0.000624415	0	14.12
6	0.3	2	5	30	0.000624415	0	14.15
6	0.3	2	5	30	0.000624415	0	14.2
6	0.3	3	5	30	0.000624415	0	10.15
6	0.3	3	5	30	0.000624415	0	10.24
6	0.3	3	5	30	0.000624415	0	10.2
6	0.3	1	1	30	0.000497583	1	95.31
6	0.3	1	1	30	0.000497583	1	95.16
6	0.3	1	1	30	0.000497583	1	95.45
6	0.3	2	1	30	0.000497583	1	51.33
6	0.3	2	1	30	0.000497583	1	51.28
6	0.3	2	1	30	0.000497583	1	51.4
6	0.3	3	1	30	0.000497583	1	40.15
6	0.3	3	1	30	0.000497583	1	40.23
6	0.3	3	1	30	0.000497583	1	40.33
6	0.3	1	3	30	0.000536035	1	48.34

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	1	3	30	0.000536035	1	48.25
6	0.3	1	3	30	0.000536035	1	48.4
6	0.3	2	3	30	0.000536035	1	25.38
6	0.3	2	3	30	0.000536035	1	25.42
6	0.3	2	3	30	0.000536035	1	25.26
6	0.3	3	3	30	0.000536035	1	18.37
6	0.3	3	3	30	0.000536035	1	18.52
6	0.3	3	3	30	0.000536035	1	18.56
6	0.3	1	5	30	0.000624415	1	32.39
6	0.3	1	5	30	0.000624415	1	32.32
6	0.3	1	5	30	0.000624415	1	32.45
6	0.3	2	5	30	0.000624415	1	15.18
6	0.3	2	5	30	0.000624415	1	15.27
6	0.3	2	5	30	0.000624415	1	15.1
6	0.3	3	5	30	0.000624415	1	13.12
6	0.3	3	5	30	0.000624415	1	13.21
6	0.3	3	5	30	0.000624415	1	13.05
6	0.3	1	1	30	0.000497583	2	123.12
6	0.3	1	1	30	0.000497583	2	123.22
6	0.3	1	1	30	0.000497583	2	123.08
6	0.3	2	1	30	0.000497583	2	63.13
6	0.3	2	1	30	0.000497583	2	63.34
6	0.3	2	1	30	0.000497583	2	63.24
6	0.3	3	1	30	0.000497583	2	50.18
6	0.3	3	1	30	0.000497583	2	50.2
6	0.3	3	1	30	0.000497583	2	50.22

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
6	0.3	1	3	30	0.000536035	2	57.03
6	0.3	1	3	30	0.000536035	2	57.16
6	0.3	1	3	30	0.000536035	2	57.09
6	0.3	2	3	30	0.000536035	2	28.08
6	0.3	2	3	30	0.000536035	2	28.25
6	0.3	2	3	30	0.000536035	2	28.14
6	0.3	3	3	30	0.000536035	2	20.08
6	0.3	3	3	30	0.000536035	2	20.25
6	0.3	3	3	30	0.000536035	2	20.15
6	0.3	1	5	30	0.000624415	2	37.30
6	0.3	1	5	30	0.000624415	2	37.36
6	0.3	1	5	30	0.000624415	2	37.33
6	0.3	2	5	30	0.000624415	2	20.30
6	0.3	2	5	30	0.000624415	2	20.25
6	0.3	2	5	30	0.000624415	2	20.40
6	0.3	3	5	30	0.000624415	2	13.26
6	0.3	3	5	30	0.000624415	2	13.47
6	0.3	3	5	30	0.000624415	2	13.38
4	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	78.85
4	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	78.26
4	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	78.41
4	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	78.51
4	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	43.88
4	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	44.10
4	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	44.03
4	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	44.00

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
4	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	30.10
4	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	30.01
4	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	30.03
4	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	30.05
4	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	45.08
4	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	44.76
4	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	44.93
4	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	44.92
4	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	23.66
4	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	23.63
4	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	23.71
4	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	23.67
4	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	16.13
4	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	16.23
4	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	16.03
4	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	16.13
4	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	38.70
4	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	38.76
4	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	38.81
4	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	38.76
4	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	17.80
4	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	17.61
4	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	18.06
4	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	17.82
4	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	11.41
4	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	11.41

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
4	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	11.41
4	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	11.41
2	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	38.65
2	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	38.63
2	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	38.70
2	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	38.66
2	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	28.55
2	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	28.42
2	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	28.63
2	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	28.53
2	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	19.68
2	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	19.77
2	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	19.92
2	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	19.79
2	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	21.55
2	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	21.46
2	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	21.53
2	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	21.51
2	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	15.38
2	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	15.47
2	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	15.33
2	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	15.39
2	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	10.50
2	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	10.42
2	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	10.60
2	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	10.51

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
2	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	15.85
2	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	15.83
2	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	15.90
2	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	15.86
2	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	11.00
2	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	11.13
2	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	11.08
2	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	11.07
2	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	7.27
2	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	7.33
2	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	7.47
2	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	7.36
2.67	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	62.60
2.67	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	62.43
2.67	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	62.68
2.67	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	62.57
2.67	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	29.43
2.67	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	29.38
2.67	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	29.67
2.67	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	29.49
2.67	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	19.75
2.67	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	19.85
2.67	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	19.97
2.67	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	19.86
2.67	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.46
2.67	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.53

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
2.67	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.40
2.67	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.46
2.67	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	15.67
2.67	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	15.50
2.67	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	15.60
2.67	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	15.59
2.67	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	10.83
2.67	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	10.75
2.67	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	9.30
2.67	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	10.29
2.67	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	15.66
2.67	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	15.75
2.67	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	15.65
2.67	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	15.69
2.67	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	10.93
2.67	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	10.88
2.67	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	11.05
2.67	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	10.96
2.67	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	7.77
2.67	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	7.67
2.67	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	7.83
2.67	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	7.76
4	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	65.17
4	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	64.97
4	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	65.27
4	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	65.13

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
4	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	31.25
4	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	31.08
4	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	31.22
4	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	31.18
4	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	22.18
4	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	22.08
4	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	22.25
4	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	22.17
4	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	38.42
4	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	38.58
4	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	38.25
4	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	38.42
4	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	18.47
4	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	18.63
4	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	18.52
4	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	18.54
4	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	12.35
4	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	12.22
4	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	12.43
4	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	12.33
4	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	29.05
4	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	29.27
4	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	29.13
4	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	29.15
4	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	13.55
4	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	13.60

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
4	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	13.75
4	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	13.63
4	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	8.83
4	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	8.75
4	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	8.93
4	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	8.84
1.5	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	32.60
1.5	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	32.52
1.5	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	32.72
1.5	0.1524	1	1	30	0.00078951	0	32.61
1.5	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	18.97
1.5	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	18.83
1.5	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	19.08
1.5	0.1524	1	3	30	0.00078951	0	18.96
1.5	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	13.75
1.5	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	13.55
1.5	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	13.63
1.5	0.1524	1	5	30	0.00078951	0	13.64
1.5	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	20.13
1.5	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	19.97
1.5	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	20.25
1.5	0.1524	2	1	30	0.00078951	0	20.12
1.5	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	11.30
1.5	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	11.10
1.5	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	11.35
1.5	0.1524	2	3	30	0.00078951	0	11.25

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
1.5	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	7.60
1.5	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	7.47
1.5	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	7.68
1.5	0.1524	2	5	30	0.00078951	0	7.58
1.5	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	14.77
1.5	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	14.63
1.5	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	14.88
1.5	0.1524	3	1	30	0.00078951	0	14.76
1.5	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	8.08
1.5	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	7.92
1.5	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	8.17
1.5	0.1524	3	3	30	0.00078951	0	8.06
1.5	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	5.17
1.5	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	5.25
1.5	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	5.30
1.5	0.1524	3	5	30	0.00078951	0	5.24
2	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	30.83
2	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	30.63
2	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	30.68
2	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	30.72
2	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	17.02
2	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	17.10
2	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	16.93
2	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	17.02
2	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	14.85
2	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	14.67

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
2	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	14.88
2	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	14.80
2	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	17.50
2	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	17.67
2	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	17.68
2	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	17.62
2	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	9.80
2	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	9.75
2	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	9.88
2	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	9.81
2	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	8.10
2	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	7.93
2	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	8.05
2	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	8.03
2	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	13.18
2	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	13.08
2	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	13.35
2	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	13.21
2	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	7.02
2	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	7.17
2	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	7.08
2	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	7.09
2	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	5.30
2	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	5.35
2	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	5.25
2	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	5.30

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
3	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.43
3	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.33
3	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.47
3	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.41
3	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	18.10
3	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	18.00
3	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	18.18
3	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	18.09
3	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	14.68
3	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	14.75
3	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	14.85
3	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	14.76
3	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.80
3	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.92
3	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.75
3	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.82
3	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	13.60
3	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	13.47
3	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	13.67
3	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	13.58
3	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	9.25
3	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	9.13
3	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	9.08
3	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	9.16
3	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.22
3	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.10

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
3	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.35
3	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.22
3	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	9.93
3	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	9.80
3	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	10.05
3	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	9.93
3	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.67
3	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.58
3	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.72
3	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.66
2	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	29.58
2	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	29.52
2	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	29.63
2	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	29.58
2	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	14.50
2	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	14.42
2	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	14.58
2	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	14.50
2	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	10.52
2	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	10.68
2	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	10.63
2	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	10.61
2	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	18.13
2	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	18.18
2	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	18.30
2	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	18.21

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
2	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	8.88
2	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	9.00
2	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	9.02
2	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	8.97
2	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	6.10
2	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	6.05
2	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	6.18
2	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	6.11
2	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.17
2	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.30
2	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.13
2	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.20
2	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	6.85
2	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	6.77
2	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	6.92
2	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	6.84
2	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	4.30
2	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	4.18
2	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	4.27
2	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	4.25
2.67	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.23
2.67	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.14
2.67	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.29
2.67	0.3048	1	1	30	0.00078951	0	32.22
2.67	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	17.23
2.67	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	17.33

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
2.67	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	17.27
2.67	0.3048	1	3	30	0.00078951	0	17.28
2.67	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	13.56
2.67	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	13.51
2.67	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	13.58
2.67	0.3048	1	5	30	0.00078951	0	13.55
2.67	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.21
2.67	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.24
2.67	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.35
2.67	0.3048	2	1	30	0.00078951	0	17.27
2.67	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	12.32
2.67	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	12.27
2.67	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	12.33
2.67	0.3048	2	3	30	0.00078951	0	12.31
2.67	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	8.35
2.67	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	8.59
2.67	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	8.53
2.67	0.3048	2	5	30	0.00078951	0	8.49
2.67	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.19
2.67	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.20
2.67	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.17
2.67	0.3048	3	1	30	0.00078951	0	13.19
2.67	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	9.30
2.67	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	9.20
2.67	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	9.28
2.67	0.3048	3	3	30	0.00078951	0	9.26

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
2.67	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.13
2.67	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.12
2.67	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.17
2.67	0.3048	3	5	30	0.00078951	0	6.14
3	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	47.10
3	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	46.59
3	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	47.02
3	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	46.90
3	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	26.01
3	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	26.09
3	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	26.04
3	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	26.05
3	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	20.05
3	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	19.34
3	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	19.54
3	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	19.64
3	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	27.05
3	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	27.03
3	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	26.58
3	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	26.89
3	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	15.02
3	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	15.01
3	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	14.58
3	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	14.87
3	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	10.49
3	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	10.51

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
3	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	10.54
3	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	10.51
3	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	18.43
3	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	18.40
3	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	18.45
3	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	18.43
3	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.32
3	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.42
3	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.38
3	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.37
3	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	7.14
3	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	7.15
3	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	7.17
3	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	7.15
2.67	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	43.48
2.67	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	43.51
2.67	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	43.50
2.67	0.1542	1	1	30	0.00078951	0	43.50
2.67	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	23.45
2.67	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	23.41
2.67	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	23.48
2.67	0.1542	1	3	30	0.00078951	0	23.45
2.67	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	18.01
2.67	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	18.03
2.67	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	17.58
2.67	0.1542	1	5	30	0.00078951	0	17.87

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
2.67	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	22.04
2.67	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	22.09
2.67	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	22.07
2.67	0.1542	2	1	30	0.00078951	0	22.07
2.67	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	13.35
2.67	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	13.33
2.67	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	13.37
2.67	0.1542	2	3	30	0.00078951	0	13.35
2.67	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	9.57
2.67	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	9.50
2.67	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	9.53
2.67	0.1542	2	5	30	0.00078951	0	9.53
2.67	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	17.24
2.67	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	17.34
2.67	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	17.27
2.67	0.1542	3	1	30	0.00078951	0	17.28
2.67	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.12
2.67	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.18
2.67	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.10
2.67	0.1542	3	3	30	0.00078951	0	9.13
2.67	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	6.37
2.67	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	6.26
2.67	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	6.30
2.67	0.1542	3	5	30	0.00078951	0	6.31
4	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	53.05
4	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	53.02

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
4	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	53.15
4	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	53.07
4	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	34.17
4	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	34.12
4	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	34.10
4	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	34.13
4	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	22.15
4	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	22.19
4	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	22.14
4	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	22.16
4	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	26.47
4	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	26.51
4	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	26.57
4	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	26.52
4	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	16.43
4	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	16.39
4	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	16.37
4	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	16.40
4	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	13.12
4	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	13.10
4	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	13.15
4	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	13.12
4	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	19.18
4	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	19.27
4	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	19.34
4	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	19.26

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
4	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	11.54
4	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	11.50
4	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	11.55
4	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	11.53
4	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	9.21
4	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	9.18
4	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	9.25
4	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	9.21
1.5	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	23.12
1.5	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	23.15
1.5	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	23.10
1.5	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	23.12
1.5	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	11.40
1.5	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	11.35
1.5	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	11.29
1.5	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	11.35
1.5	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	8.08
1.5	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	8.13
1.5	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	8.10
1.5	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	8.10
1.5	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	10.33
1.5	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	10.40
1.5	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	10.45
1.5	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	10.39
1.5	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	5.54
1.5	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	5.50

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
1.5	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	5.56
1.5	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	5.53
1.5	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	4.20
1.5	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	4.26
1.5	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	4.23
1.5	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	4.23
1.5	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	8.23
1.5	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	8.19
1.5	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	8.20
1.5	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	8.21
1.5	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	3.50
1.5	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	3.53
1.5	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	3.49
1.5	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	3.51
1.5	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	3.03
1.5	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	2.58
1.5	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	2.59
1.5	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	2.73
3	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	40.09
3	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	40.15
3	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	40.10
3	0.2032	1	1	30	0.00078951	0	40.11
3	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	24.56
3	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	24.45
3	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	24.50
3	0.2032	1	3	30	0.00078951	0	24.50

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
3	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	18.06
3	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	18.10
3	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	18.04
3	0.2032	1	5	30	0.00078951	0	18.07
3	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.32
3	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.28
3	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.24
3	0.2032	2	1	30	0.00078951	0	22.28
3	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	11.46
3	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	11.44
3	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	11.40
3	0.2032	2	3	30	0.00078951	0	11.43
3	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	9.37
3	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	9.29
3	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	9.32
3	0.2032	2	5	30	0.00078951	0	9.33
3	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	18.14
3	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	17.01
3	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	18.05
3	0.2032	3	1	30	0.00078951	0	17.73
3	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	8.37
3	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	8.40
3	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	8.39
3	0.2032	3	3	30	0.00078951	0	8.39
3	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	6.51
3	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	6.56

ตาราง ข.1 ระยะเวลาการดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน (ต่อ)

L	D	n	β	θ	V	lifter	MRT
(m)	(m)	(rpm)	(degree)	(degree)	(m ³ /min)	(piece)	(min)
3	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	6.54
3	0.2032	3	5	30	0.00078951	0	6.54





ภาคผนวก ค

การสร้างสมการสัมพันธ์สำหรับทำนายระยะเวลาดำเนินการของเตาเผาแบบหมุน

การสร้างพารามิเตอร์ไร้มิติโดยใช้ทฤษฎี Buckingham pi

ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาดำเนินการเฉลี่ยมาสร้างความสัมพันธ์กันโดยใช้ทฤษฎี Buckingham pi โดยตัวแปรที่นำมาใช้คือ มุมโน้มเอียงของเตาเผาแบบหมุน (β), ความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาแบบหมุน (n), มุมรีโพสของวัสดุ (θ), อัตราการป้อนเชิงปริมาตรของวัสดุ (V), ความยาวของเตาเผาแบบหมุน (L), เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาแบบหมุน (D) และจำนวนใบกวนภายในเตาเผาแบบหมุน (N) โดยจะได้เป็นฟังก์ชันดังสมการ ค1 และมีวิธีการดังนี้

$$MRT = f(n, \beta, L, D, V, \theta, N) \quad (ค1)$$

ขั้นตอนที่ 1 : $N = 8$; MRT, n , β , L , D , V , θ , N

ขั้นตอนที่ 2 : ทำตารางหน่วยของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ตาราง ค.1 ตารางหน่วยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในมิติ MLT และ FLT

ตัวแปร	หน่วย	ระบบมิติ MLT	ระบบมิติ FLT
MRT	min	t	T
n	rpm	t ⁻¹	t ⁻¹
β	degree	-	-
L	meter	m	m
D	meter	m	m
V	meter ³ /min	m ³ t ⁻¹	m ³ t ⁻¹
θ	degree	-	-
N	piece	-	-

ขั้นตอนที่ 3 : เลือกใช้ระบบมิติ MLT

ขั้นตอนที่ 4 :

	MRT	n	β	L	D	V	θ	N
M	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	1	1	3	0	0
T	1	-1	0	0	0	-1	0	0

จะได้ $m = 2$

ดังนั้น จำนวนพารามิเตอร์ไร้มิติที่สร้าง $(N-m) = 8 - 2 = 6$

ขั้นตอนที่ 5 : เลือกพารามิเตอร์ซ้ำ 2 ตัว คือ V และ D

จาก $\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5)$

หา $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$

π_1 ; $\pi_1 = V^a D^b MRT$

$$\pi_1 = (LT^{-1})^a (L)^b (T)$$

$$(LT^{-1})^a (L)^b (T) = M^0 L^0 T^0$$

จะได้ L ; $3a+b = 0$

$$T ; -a+1 = 0$$

$$a = 1, b = 3$$

ดังนั้น

$$\pi_1 = V^1 D^{-3} MRT = \frac{V(MRT)}{D^3}$$

π_2 ;

$$\pi_2 = V^a D^b \beta$$

$$\pi_2 = (LT^{-1})^a (L)^b (1)$$

$$(LT^{-1})^a (L)^b (1) = M^0 L^0 T^0$$

จะได้ L ; $3a+b = 0$

$$T ; -a = 0$$

$$a = 0, b = 0$$

ดังนั้น

$$\pi_2 = V^0 D^0 \beta = \beta$$

π_3 ;

$$\pi_3 = V^a D^b n$$

$$\pi_3 = (LT^{-1})^a (L)^b (T^{-1})$$

$$(LT^{-1})^a (L)^b (T^{-1}) = M^0 L^0 T^0$$

จะได้ L ; $3a+b = 0$

$$T ; -a-1 = 0$$

$$a = -1, b = 3$$

ดังนั้น

$$\pi_3 = V^{-1} D^3 n = \frac{D^3 n}{V}$$

$$\begin{aligned}\pi_4 ; & \quad \pi_4 = V^a D^b \theta \\ & \quad \pi_4 = (L^3 T^{-1})^a (L)^b (1) \\ & \quad (L^3 T^{-1})^a (L)^b (1) = M^0 L^0 T^0\end{aligned}$$

จะได้ L ; $3a+b = 0$

$$T ; -a = 0$$

$$a = 0, b = 0$$

ดังนั้น

$$\pi_4 = V^0 D^0 \theta = \theta$$

$$\begin{aligned}\pi_5 ; & \quad \pi_5 = V^a D^b L \\ & \quad \pi_5 = (L^3 T^{-1})^a (L)^b (L)^1 \\ & \quad (L^3 T^{-1})^a (L)^b (L)^1 = M^0 L^0 T^0\end{aligned}$$

จะได้ L ; $3a+b+1 = 0$

$$T ; -a = 0$$

$$a = 0, b = -1$$

ดังนั้น

$$\pi_5 = V^0 D^{-1} L = \frac{L}{D}$$

$$\begin{aligned}\pi_6 ; & \quad \pi_6 = V^a D^b N \\ & \quad \pi_6 = (L^3 T^{-1})^a (L)^b (1) \\ & \quad (L^3 T^{-1})^a (L)^b (1) = M^0 L^0 T^0\end{aligned}$$

จะได้ L ; $3a+b = 0$

$$T ; -a = 0$$

$$a = 0, b = 0$$

ดังนั้น

$$\pi_6 = V^0 D^0 N = N$$

ขั้นตอนที่ 6 : ใช้ระบบมิติ FLT ในการตรวจสอบพารามิเตอร์ไร้มิติ

$$\pi_1 = \frac{V(MRT)}{D^3} = \frac{(L^3 T^{-1})(T)}{L^3} = 1$$

$$\pi_2 = \beta = 1$$

$$\pi_3 = \frac{D^3(n)}{V} = \frac{L^3(T^{-1})}{L^3 T^{-1}} = 1$$

$$\pi_4 = \theta = 1$$

$$\pi_5 = \frac{L}{D} = \frac{L}{L} = 1$$
$$\pi_6 = N = 1$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{V(MRT)}{D^3} = f\left(\beta, \frac{D^3(n)}{V}, \theta, \frac{L}{D}, N\right)$$



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล ณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล
วัน เดือน ปี เกิด 23 กันยายน 2535
สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน
ที่อยู่ปัจจุบัน 207/222 ซอยเพชรเกษม 112 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ
 10160

