การสร้างและทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

โดย
นายสรรพสิทธิ์ ชลพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การสร้างและทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

โดย
นายสรรพสิทธิ์ ชลพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

CONSTRUCTION AND TESTING OF CONTINUOUS FEED BIOMASS THERMOSYPHON TORREFACTION REACTOR

By

MR. Sanphasit CHONLAPHAN

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	การสร้างและทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง
โดย	สรรพสิทธิ์ ชลพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

....ประธานกรรมการ

(ดร.ณัฐ ธัชยะพงษ์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระนุช อินทะกันฑ์)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธาราวดี)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ดร.สุระ ตันดี)

57406801 : วิศวกรรมพลังงาน แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

นาย สรรพสิทธิ์ ชลพันธ์: การสร้างและทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

งานวิจัยนี้มีความสนใจในการสร้างและทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง ซึ่งเป็นเตาปฏิกรณ์ที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนเป็นแหล่งความร้อน การสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ระบบลำเลียงชีวมวลเพื่อป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน และอุปกรณ์เก็บชีวมวลหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่น การทดสอบเตาปฏิกรณ์ทำโดยใช้กระบวนการทอรีแฟคชั่นที่สภาวะอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 และ 270 องศาเซลเซียส ระยะเวลากระบวนการ 45, 75 และ 105 นาที โดยใช้ชีวมวลฟางข้าวสับละเอียดเป็นตัวอย่างในการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วยผลได้เชิงมวล, ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, ค่าความหนาแน่นบัลค์, ค่าความหนาแน่นพลังงาน และ ผลได้ของพลังงาน เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชื้อเพลิงดังกล่าว ในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะมีการบันทึกอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์และหาอัตราการให้ความร้อนในแต่ละสภาวะของการทอรีแฟคชั่น จากผลการทดลองพบว่าค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าความหนาแน่นบัลค์ และ ค่าความหนาแน่นพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลากระบวนการและอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ส่วนค่าผลได้เชิงมวล และ ผลได้ของพลังงานมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลากระบวนการและอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น การกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์มีลักษณะค่อย ๆ ลดลงจากด้านล่างซึ่งเป็นบริเวณให้ความร้อนจนถึงด้านบนเตาปฏิกรณ์ จุดที่อุณหภูมิสูงสุดคือที่ระดับความสูง 7 เซนติเมตร ส่วนจุดที่อุณภูมิต่ำที่สุด คือ 66 เซนติเมตร จากฐานของเตาปฏิกรณ์ ซึ่งผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของเตาปฏิกรณ์ ณ สภาวะที่เตาปฏิกรณ์ทำงานคงที่แล้วคือ 25.69% และ 29.55% สำหรับกรณีอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 และ 270 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

57406801 : Major (ENERGY ENGINEERING)

MR. SANPHASIT CHONLAPHAN : CONSTRUCTION AND TESTING OF CONTINUOUS FEED BIOMASS THERMOSYPHON TORREFACTION REACTOR THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. NITIPONG SOPONPONGPIPAT

The objective of this research is the construction and testing of continuous feed biomass thermosyphon torrefaction reactor. The reactor will construct as a continuous reactor that has thermosyphon heat pipe as a heat source. The construction of reactor will build in 2 section. The first is the feeding section, the second is the reactor section and the last is stocking torrified biomass section. The testing of reactor will continue by torrefaction process biomass with the reactor. The sample is rice straw sawdust. Torrefaction condition has a torrefaction temperature of 230 and 270 ˚C, torrefaction time of 45, 75, and 105 minutes. The fuel properties of the sample was tested to find out the mass yield, high heating value, bulk density, energy density, and energy yield. The result has shown that high heating value, bulk density, and energy density increase when torrefaction temperature and torrefaction time are increased; while mass yield and energy yield decrease when torrefaction temperature and torrefaction time are increased. The temperature distribution of the reactor is slightly lower from the bottom of the reactor (that close to the heat transfer spot) to the top of the reactor. The highest temperature is in 7 centimeters and the lowest is in 66 centimeters from the bottom of the reactor. At a steady state, the difference of the highest and lowest temperatures of the reactor is 25.69% and 29.55% for a torrefaction temperature of 230 and 270 ˚C respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ ในความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ ที่กรุณาให้คำแนะ ให้คำปรึกษา ปรับปรุงทั้งวิทยานิพนธ์และความรู้ ความสามารถ จนสามารถทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และคอยกรุณาเมตตา แม้ในเวลาที่สุขภาพไม่อำนวยต่อการศึกษา

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตาสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลยานยนต์ที่มอบโอกาสให้ได้มาศึกษาด้านวิศวกรรมพลังงานโดยมีผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาจนสามารถมีทุกวันนี้ได้

ขอขอบคุณภรรยาที่คอยให้กำลังใจในจนสามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ ในขณะที่ศึกษาและทำการปรับปรุงเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนแล้วเสร็จ

ขอขอบคุณนักศึกษาทุกท่านทั้งระดับปริญญาเอก ปริญญาโท และ ปริญญาตรี จากภาควิชาวิศวกรรมพลังงานห้องปฏิบัติการด้านพลังงาน ที่คอยให้กำลังใจและคอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนสามารถผ่านพ้นอุปสรรคมาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งสำหรับทุกความกรุณาของทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือเสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้วิจัยจึงอยากขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

นาย สรรพสิทธิ์ ชลพันธ์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.................... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.................... จ

กิตติกรรมประกาศ.................... ฉ

สารบัญ.................... ช

สารบัญตาราง.................... ฌ

สารบัญรูปภาพ.................... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.................... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 9

1.3 สมมติฐานของการวิจัย 9

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 9

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย 10

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.................... 10

1.7 ความจำกัดของการวิจัย 11

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ 11

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.................... 11

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

2.1. ชีวมวล 12

2.2 กระบวนการเคมีความร้อน.................... 14

2.3 กระบวนการทอรีแฟคชั่น 15

2.4 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น.................... 24

2.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ 34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 41
3.1 แผนการวิจัย 41
3.2 แผนการทดลอง 42
3.3 วิธีการทดลอง 44
3.4 วัตถุดิบและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย 53
3.5 ระยะเวลาการวิจัย 57
บทที่ 4 ผลการทดลอง 58
4.1 การกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ในช่วงเปลี่ยนแปลง 58
4.2 การกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ในช่วงพฤติกรรมคงตัว 63
4.3 คุณสมบัติเชื้อเพลิง 69
4.4 การสลายตัวของชีวมวลและผลได้พลังงาน 87
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 91
5.1 สรุปผลการทดลอง 91
5.2 ข้อเสนอแนะ 93
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ 96
ภาคผนวก ข ผลการทดลองค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิง 109
รายการอ้างอิง 111
ประวัติผู้เขียน 116

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตัวอย่างองค์ประกอบของชีวมวลขยะ 13

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของชีวมวลลิกโนเซลลูโลส 14

ตารางที่ 3 แสดงผลผลิตของกระบวนการเทอร์โมเคมิคอลแต่ละประเภท 15

ตารางที่ 4 ช่วงอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่น 16

ตารางที่ 5 แสดงข้อดีข้อเสียของเตาทอรีแฟคชั่นแต่ละชนิด 32

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของชีวมวลขี้เลื่อย Prosopis juliflora ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ 38

ตารางที่ 7 สภาวะการทดลอง 44

ตารางที่ 8 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย 57

ตารางที่ 9 บันทึกอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับเวลากรณีควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350 องศาเซลเซียส 97

ตารางที่ 10 บันทึกอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับเวลากรณีควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส 101

ตารางที่ 11 บันทึกอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับเวลากรณีควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 450 องศาเซลเซียส 105

ตารางที่ 12 ผลการทดลองค่าความร้อนเชื้อเพลิง 110

ตารางที่ 13 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นบัลค์ 110

ตารางที่ 14 ผลการทดลองค่าความหนาพลังงาน 110

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 เตาปฏิกรณ์ชนิดมูฟวิ่งเบด 3

ภาพที่ 2 ผังการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นมูฟวิ่งเบด 4

ภาพที่ 3 เตาปฏิกรณ์ชนิดมัลติเปิ้ลฮาร์ท........ 5

ภาพที่ 4 ลักษณะการเคลื่อนที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาฟลุอิไดซ์เบด 6

ภาพที่ 5 เตาปฏิกรณ์ชนิดโรตารี่ดรัม 7

ภาพที่ 6 เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ 7

ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของมวลและพลังงานหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น[6]........ 16

ภาพที่ 8 กระบวนการทอรีแฟคชั่นของกิ่งเมเปิ้ล [6]........ 17

ภาพที่ 9 ขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่น [13] 17

ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของโพลีแซกคาไรและลิกนินในกระบวนการทอรีแฟคชั่น [11]........ 19

ภาพที่ 11 ผลผลิตจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่แตกต่างกันสองสภาวะ [23]........ 19

ภาพที่ 12 องค์ประกอบของผลผลิตจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น [13]........ 22

ภาพที่ 13 ลักษณะพฤติกรรมของทรายภายในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์ [31] 25

ภาพที่ 14 การทำงานของเตาฟลูอิไดซ์เบดซึ่งมีการวนนำทรายกลับเข้าสู่เตาเป็นวัฏจักร [32]........ 25

ภาพที่ 15 ลักษณะการทำงานของเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด [2]........ 25

ภาพที่ 16 ขั้นตอนการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบดโดยใช้ก๊าซไอเสียช่วย........ 26

ภาพที่ 17 ลักษณะของเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดของ Medic D. [4]........ 27

ภาพที่ 18 ระบบการทำงานของเตาทอรีแฟคชั่นแบบไฮโดรเทอร์มอล และรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิปฏิบัติการต่าง ๆ [34] 28

ภาพที่ 19 ระบบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารี่ คลิน [37] 29

ภาพที่ 20 ลักษณะของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารี่ คลิน [38]........ 30

ภาพที่ 21 ผังอุปกรณ์สำหรับการทดลองด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ [39] 31

ภาพที่ 22 ลักษณะการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอน [40] 31

ภาพที่ 23 ตำแหน่งการวางท่อภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเทอร์โมไซฟอน สีแดงคือท่อเทอร์โมไซฟอน สีส้มคือครีบนำความร้อน สีเขียวคือชีวมวล 32

ภาพที่ 24 ผังการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นสกรูคอนเวเยอร์ของ Nachenius R. 35

ภาพที่ 25 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลของเตาปฏิกรณ์สกรูคอนเวเยอร์ของ Nachenius R. [43]. 36

ภาพที่ 26 อุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ภายในเตาปฏิกรณ์สกรูคอนเวเยอร์จากจุดป้อนชีวมวลของ Nachenius R. [43] 36

ภาพที่ 27 อุณหภูมิตามตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลของเตาปฏิกรณ์สกรูคอนเวเยอร์ของ Nachenius R. [43] 37

ภาพที่ 28 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงมวลของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างกัน 38

ภาพที่ 29 กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างกระบวนดารทอรีแฟคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ค่ากำลังไมโครเวฟต่างกัน 300, 450 และ 600 W (a) อนุภาคขนาด 0.25 - 0.5มิลลิเมตร (b) 1.4 - 2.0 มิลิเมตร (c) 2 - 4 มิลิเมตร ค่าอัตราการให้ความร้อนคำนวณในช่วง 100 - 200 องศาเซลเซียส 39

ภาพที่ 30 แผนการวิจัย 43

ภาพที่ 31 แผนการทดลอง 43

ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลาและอุณหภูมิด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ 46

ภาพที่ 33 เครื่องทดสอบหาค่าความหนาแน่นบัลค์ 49

ภาพที่ 34 แสดงภาพรวมของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องและตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ 52

ภาพที่ 35 ชีวมวลขี้เลื่อย 53

ภาพที่ 36 เครื่องสับหยาบ Gimatic รุ่น MA110 54

ภาพที่ 37 เครื่องสับละเอียด Gimatic รุ่น MA207 54

ภาพที่ 38 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน 38 (ก.) และ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง 38 (ข.) 55

ภาพที่ 39 เครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec midi LOGGER GL820 55

ภาพที่ 40 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด k (thermocouple) 56

ภาพที่ 41 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบวางพื้น ยี่ห้อ AND รุ่น EM-150KAL 56

ภาพที่ 42 อุณหภูมิเฉลี่ยของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ กรณี 350 องศาเซลเซียส 58

ภาพที่ 43 อุณหภูมิเฉลี่ยของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ กรณี 400 องศาเซลเซียส 59

ภาพที่ 44 อุณหภูมิเฉลี่ยของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ กรณี 450 องศาเซลเซียส 60

ภาพที่ 45 อุณหภูมิชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นช่วงพฤติกรรมคงตัว ที่กรณีห้องให้ความร้อน 350 องศาเซลเซียส บรรจุชีวมวลครั้งที่ 4 และ 5 63

ภาพที่ 46 อุณหภูมิชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นช่วงพฤติกรรมคงตัว ที่กรณีห้องให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส บรรจุชีวมวลครั้งที่ 4 และ 5 65

ภาพที่ 47 อุณหภูมิชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นพฤติกรรมคงตัว ที่กรณีห้องให้ความร้อน 450 องศาเซลเซียส บรรจุชีวมวลครั้งที่ 4 และ 5 66

ภาพที่ 48 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลเทียบกับเวลาภายในเตาปฏิกรณ์ 69

ภาพที่ 49 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว 71

ภาพที่ 50 อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว 72

ภาพที่ 51 อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงร่วมกับงานวิจัยสืบค้น [5, 33, 49, 51-54] 74

ภาพที่ 52 ความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลเทียบกับเวลาภายในเตาปฏิกรณ์ 76

ภาพที่ 53 ความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว 78

ภาพที่ 54 อัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์เทียบร่วมกับงานวิจัยสืบค้น [52] [54] 79

ภาพที่ 55 ความหนาแน่นพลังงานของชีวมวล 81

ภาพที่ 56 ความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว 83

ภาพที่ 57 อัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว 83

ภาพที่ 58 อัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเทียบกับงานวิจัยสืบค้น [5, 52-54]........ 85

ภาพที่ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความร้อนเชื้อเพลิง - ผลผลิตเชิงมวล และเส้น iso – energy yield ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเทียบกับงานวิจัยสืบค้น [33, 49-51].... 87

ภาพที่ 60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความร้อนเชื้อเพลิง - ผลผลิตเชิงมวล และเส้น iso – energy yield ของชีวมวลในลำดับต่าง ๆ........ 89

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถึงแม้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างเช่น ถ่าน น้ำมัน หรือแก๊ส เป็นแหล่งพลังงานสามารถหาใช้ได้อย่างสะดวกและมีความต้องการสูง แต่เชื้อเพลิงฟอสซิลไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และมีจำกัด ขณะที่พืชสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ทุกปี หรือในกรณีการตัดต้นไม้เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถปลูกทดแทนได้โดยใช้เวลาเพียง 3-10 ปีเท่านั้นในไม้ลำต้นแข็ง เช่น ยูคาลิปตัส ต้นวิลโล่ [1] ชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ แตกต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งต้องผ่านการย่อยสลายมานับล้านปีเพื่อสร้างขึ้นมา ด้วยเหตุนี้ชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานที่มั่นคงและเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับการผลิตพลังงานรวมถึงดีต่อการการรักษาสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เหตุผลที่ควรเลือกชีวมวลในการผลิตพลังงาน เพราะชีวมวลมีลักษณะพิเศษ คือ ไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อบรรยากาศ

ชีวมวลเป็นสิ่งที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตเช่นพืชหรือสัตว์ เป็นสิ่งมีชีวิต หรือ เคยมีชีวิตโดยที่ยังไม่ผ่านการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ นับเป็นอินทรีย์วัตถุประเภทหนึ่ง [1] ชีวมวลประเภทพืชเจริญเติบโตด้วยการสังเคราะห์แสง โดยการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศไปใช้ เมื่อเผาชีวมวลมันจะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับเพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น เพราะฉะนั้นการเผาชีวมวลจึงไม่เป็นการเพิ่มระดับคาร์บอนไดออกไซด์ของโลก นอกจากนี้ชีวมวลยังสามารถนำไปใช้สร้างความร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ผลิตเชื้อเพลิง เช่น แก๊สโซลีนผสมเอธานอล E10 E20 E85 เอธานอล E100 และน้ำมันไบโอดีเซล [1] ชีวมวลสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเฉพาะทางเคมีของชีวมวล คือ Lignocellulose, Sugar-derived และ Triglyceride โดยลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) เป็นชีวมวลที่เหมาะสำหรับนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงและสารเคมีเนื่องจากมีลิพิดต่ำ มีสัดส่วนปริมาณของเส้นใยสูงและมีองค์ประกอบจำพวกน้ำตาล [2] เพราะจะทำให้ค่าความร้อนสูง (HHV)

เพื่อนำชีวมวลไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน จึงมีการกักเก็บชีวมวลไว้รวมถึงการขนส่งชีวมวลไปตามแหล่งแปรรูปต่าง ๆ แต่ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวของชีวมวล คือ มีความชื้นสูง มีความหนาแน่นรวมต่ำ (Low bulk density) ความหนาแน่นพลังงานต่ำ (Low energy density) รวมถึงเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานจะเกิดการเสื่อมสลายเนื่องจากจุลินทรีย์ มีปริมาณออกซิเจนสูงและมีความหลากหลาย

ของแหล่งที่มา จึงเป็นอุปสรรค์อย่างมากต่อการกักเก็บและขนส่งชีวมวล กระบวนการทอรีแฟคชั่น สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความต้านทานการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ (Resistance to biological degradation) เพิ่มความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) เพิ่มความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) เพิ่มความสามารถในการบด (Grindability) ปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมี ช่วยลดปัญหาและลดค่าใช้จ่ายในการกักเก็บและการขนส่งชีวมวล

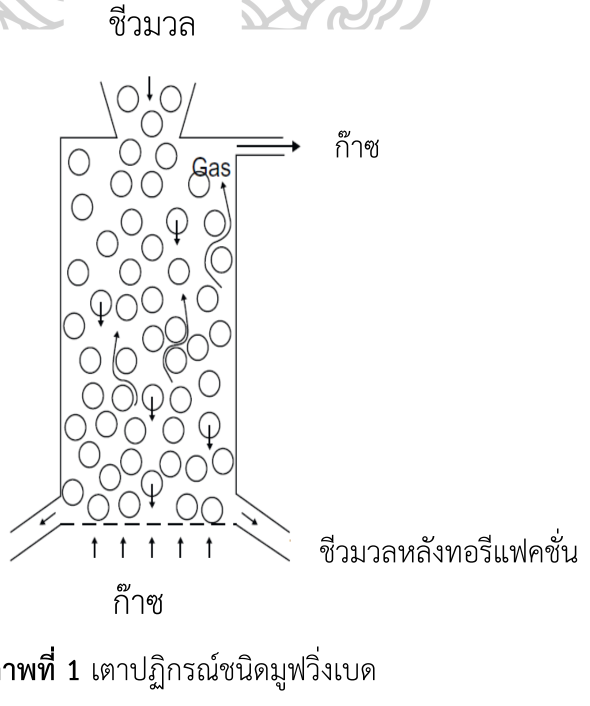
ทอรีแฟคชั่นเป็นกระบวนการเคมีความร้อนดำเนินการในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อยและอัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที [1, 3, 4] กระบวนการแปรรูปชีวมวลดำเนินการภายในเตาทอรีแฟคชั่น (Torrefaction reactor) ซึ่งมีหลายประเภทแตกต่างกันตามกลไกในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับชีวมวล ยกตัวอย่างเช่น เตาแบบฟิกซ์เบด เตาแบบฟลูอิไดซ์เบด เตาแบบมูฟวิ่งเบด เตาแบบมัลติเปิ้ลเฮิร์ท เป็นต้น กลไกในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาทอรีแฟคชั่นมีทั้งการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และ การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ขึ้นกับลักษณะเฉพาะของเตาแต่ละชนิด นอกจากนี้ ยังสามารถปรับปรุงการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาทอรีแฟคชั่นด้วยการใช้ของไหลอุณหภูมิสูง (Carrier gas) [4] ช่วยสร้างบรรยากาศแบบเฉื่อย ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง ช่วยนำสารระเหยและน้ำ ออกจากระบบของกระบวนการทอรีแฟคชั่น ดังนั้นการใช้ของไหลจึงช่วยปรับปรุงกลไกการแลกเปลี่ยนความร้อนต่อชีวมวลให้ดีขึ้นและทำให้ผลผลิตมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันตลอดทั้งเตา

อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นและระยะเวลากระบวนการเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอย่างมาก เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติเชื้อเพลิงหลังเสร็จสิ้นกระบวนการด้วยเช่นกัน เตาปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดห้องปฏิบัติการมักมีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญสำหรับในการปรับปรุงและพัฒนาเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น จึงมีการสร้างเตาปฏิกรณ์ขึ้นมาหลายชนิดเพื่อต้องการแก้ปัญหาในเรื่องความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ และพัฒนาเตาปฏิกรณ์ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเพื่อประโยชน์ในการนำเตาปฏิกรณ์ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เตาปฏิกรณ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันแต่ละชนิดมีลักษณะการทำงานและการให้ความร้อนที่แตกต่างกันออกไปตามกลไกลการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอาจถ่ายเทความร้อนผ่านของไหลชีวมวลด้วยการพากลางสู่อนุภาคของชีวมวลหรือ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนสู่อนุภาคของชีวมวลถูกแบ่งออกเป็น จากผนังสู่อนุภาคชีวมวลด้วยการนำความร้อน, จากของไหลกลางสู่, การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้ความร้อนกับชีวมวล และการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคชีวมวลด้วยการนำความร้อนและการแผ่รังสีความ

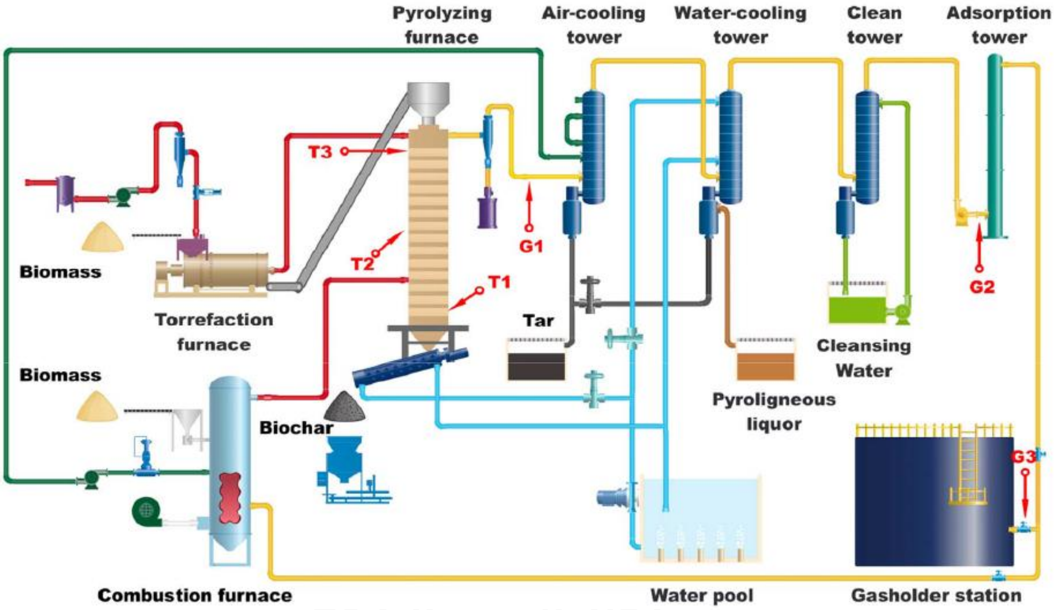
ร้อน จากกลไกการให้ความร้อนดังที่กล่าวมาทำให้สามารถแบ่งเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นออกได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1.1.1 เตาปฏิกรณ์ประเภทให้ความร้อนโดยตรง คือ เตาปฏิกรณ์ที่ให้ความร้อนโดยตรงต่ออนุภาคของชีวมวล โดยใช้ตัวกลางในการพาความร้อนและแลกเปลี่ยนความร้อนกับชีวมวลโดยตรง ตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนต้องถูกควบคุมไม่ให้มีปริมาณออกซิเจน หรือ มีในปริมาณที่ต่ำในระดับที่จะไม่เกิดปฏิกิริยากับอนุภาคของชีวมวล ตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น ของไหลที่มีความร้อนก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้, น้ำมัน, น้ำ เป็นต้น ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์ที่ทำงานโดยการให้ความร้อนต่อชีวมวลโดยตรงมีดังต่อไปนี้

1.1.1.1เตาปฏิกรณ์ที่แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการพาความร้อน เป็นเตาปฏิกรณ์พื้นฐานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น คือ ใช้ของไหลร้อนเป็นตัวกลางไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอนุภาคของชีวมวลโดยตรงด้วยการพาความร้อน ซึ่งของไหลที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนควรเป็นก๊าซเฉื่อยหรือมีออกซิเจาเพียง 2 - 3% หากชีวมวลไม่มีการเคลื่อนที่ตลอดกระบวนการทอรีแฟคชั่น เตาปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานแบบนี้เรียกว่าเตาปฏิกรณ์ชนิดฟิกซ์เบด (ฟิกซ์เบด) หากอนุภาคของชีวมวลมีการเคลื่อนที่ตลอดกระบวนการทอรีแฟคชั่นตลอดแนวผนังเตา เตาปฏิกรณ์ลักษณะนี้เรียกว่าเตาปฏิกรณ์ชนิดมูฟวิ่งเบด ดังแสดงในภาพที่ 1 [1] และภาพที่ 2 [5]

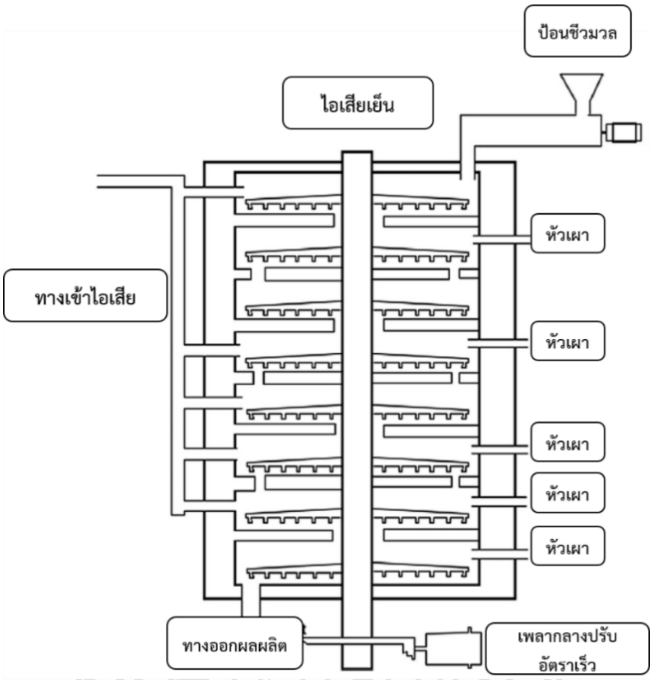


ภาพที่ 1 เตาปฏิกรณ์ชนิดมูฟวิ่งเบด



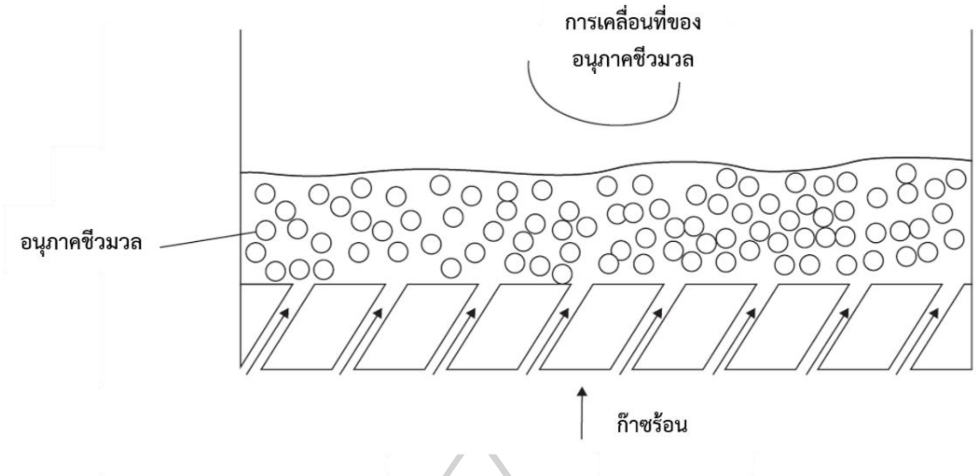
ภาพที่ 2 ผังการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นมูฟวิ่งเบด

เตาปฏิกรณ์ชนิดมูฟวิ่งเบดดังภาพที่ 1 อนุภาคของชีวมวลเคลื่อนที่จากด้านบนที่ปากทางป้อนชีวมวลสู่ด้านล่างเตาปฏิกรณ์โดยการใช้แรงโน้มถ่วง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในเตาปฏิกรณ์ชนิดมูฟวิ่งเบด (Moving bed reactor) ยังมีลักษณะอื่น ๆ อีก เช่นการใช้การสั่นสะเทือนของสายพานลำเลียง เตาปฏิกรณ์ลักษณะนี้เรียกว่าเตาปฏิกรณ์ชนิดมัลติเปิ้ลฮาร์ท (Multiple heart reactor) ดังแสดงในภาพที่ 3 [1]



ภาพที่ 3 เตาปฏิกรณ์ชนิดมัลติเปิ้ลฮาร์ท

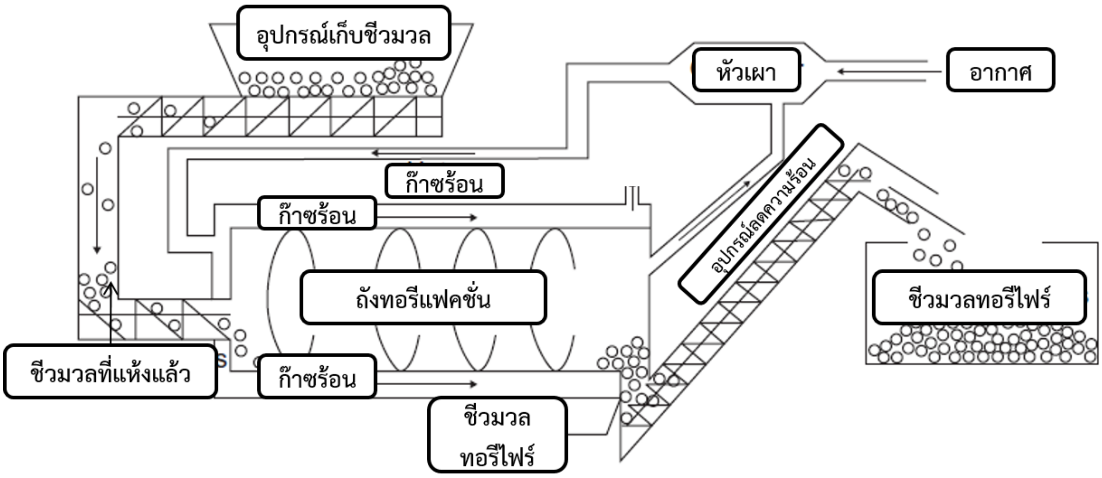
1.1.2 เตาฟลูอิไดซ์เบด ลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลซึ่งเป็นตัวกลางและอนุภาคของชีวมวลของเตาปฏิกรณ์ลักษณะมีลักษณะเฉพาะตัว คือ ของไหลที่เป็นตัวกลางจะมีของแข็งปนอยู่ด้วยส่วนมากมักเป็นทราย ภายในเตาปฏิกรณ์จะใช้ของไหลตัวกลางพัดชีวมวลให้ลอยและหมุนวนภายในเตาปฏิกรณ์และแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างนั้น เพราะฉะนั้นกลไกในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์จึงมีทั้งการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับอนุภาคของชีวมวล และ ของแข็งกับอนุภาคของชีวมวล ลักษณะการเคลื่อนที่แลกเปลี่ยนความร้อนของอนุภาคชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์แสดงไว้ดังภาพที่ 4 [1]



ภาพที่ 4 ลักษณะการเคลื่อนที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาฟลูอิไดซ์เบด

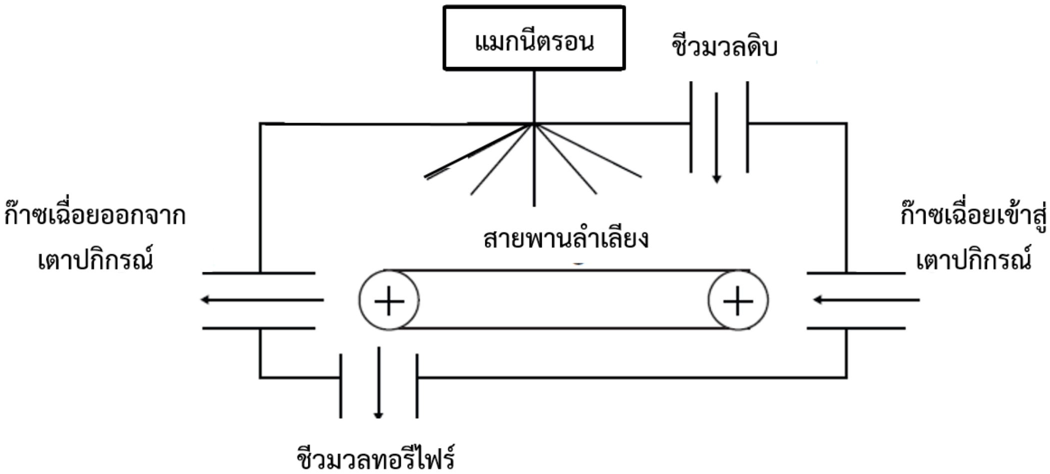
1.1.3 เตาปฏิกรณ์ประเภทให้ความร้อนทางอ้อม การทำงานของเตาลักษณะนี้ของไหลตัวกลางจะไม่สัมผักกับอนุภาคของชีวมวลโดยตรง การให้ความร้อนกับระบบจะแลกเปลี่บนความร้อนกันผ่านผนังเตา, การแผ่รังสีความร้อน และ ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้สามารถควบคุมสภาวะภายในเตาปฏิกรณ์ให้ปราศจากออกซิเจนได้ง่ายขึ้นเพราะไม่มีการสัมผัสกับอนุภาคของชีวมวลโดยตรง เนื่องจากลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังเตาปฏิกรณ์สู่อนุภาคชีวมวล ระหว่างอนุภาคของชีวมวล หรือการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะการกระจายตัวของอุหณภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ประเภทให้ความร้อนโดยอ้อมจึงไม่สม่ำเสมอ [1] ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนทางอ้อมมีดังนี้

1.1.3.1 โรตารี่ดรัม ความร้อนจะถูกใช้เพื่อทำให้ถังสำหรับหมุนแลกเปลี่ยนความร้อนกับชีวมวลร้อนขึ้น เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนทางอ้อม อนุภาคของชีวมวลจะรับความร้อนผ่านผนังของถังเตาปฏิกรณ์อีกต่อหนึ่ง จากภาพที่ 4 [6] จะเห็นว่าก๊าซร้อนให้ความร้อนกับผนังของถังไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับอนุภาคของชีวมวล



ภาพที่ 5 เตาปฏิกรณ์ชนิดโรตารี่ดรัม

1.1.3.2 เตาปฏิกรณ์ที่ทำงานด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นการให้ความร้อนด้วยการประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการถ่ายเทความร้อน เพราะฉะนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟของชีวมวลหรือวัสดุนั้น ๆ ด้วย เช่นกัน ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟแสดงไว้ดังภาพที่ 6 [6]



ภาพที่ 6 เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแต่ละชนิดมีลักษณะในการถ่ายเทความร้อนสู่อนุภาคของชีวมวลและลักษณะเคลื่อนที่ของอนุภาคชีวมวลหรือของไหลตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน

ความต้องการที่จะพยายามให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สม่ำเสมอนั้นเป็นปัญหาสำคัญของเตาปฏิกรณ์ดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าที่เตาปฏิกรณ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนทางอ้อมจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำได้เพียงผ่านผนังเตาปฏิกรณ์และแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคชีวมวล ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรงจึงทำให้มีการสูญเสียความร้อน [6] ในด้านการแลกเปลี่ยนความร้อนถือว่าเสียเปรียบเตาปฏิกรณ์ชนิดให้ความร้อนโดยตรง แต่เตาปฏิกรณ์ชนิดให้ความร้อนทางอ้อมสามารถสร้างสภาวะเฉื่อยภายในเตาและควบคุมให้อยู่ในสภาวะได้ง่ายเนื่องจากไม่มีอากาศภายนอกเข้าไปรบกวนระบบ เตาปฏิกรณ์ชนิดที่ทำงานต่อเนื่องมีข้อดีที่สามารถดำเนินกระบวนการได้ในระยะยาวไม่ต้องหยุดเพื่อเก็บชีวมวลหลังเสร็จกระบวนการทอรีแฟคชั่นเป็นระยะ แต่เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่ทำงานต่อเนื่องมักมีกลไกการทำงานที่ซับซ้อน คือ มีการใช้สกรู ใช้ถังต่อการระบบมอเตอร์ หรือใช้สายพาน เช่น เตาปฏิกรณ์โรตารี่ดรัม เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ และเตาปฏิกรณ์มัลติเปิ้ลฮาร์ท เป็นต้น ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ขยับมากเมื่อรวมกับระบบการถ่ายเทความร้อนจะทำให้การทำงานของเตามีความซับซ้อน

จากที่กล่าวมาข้างต้นทางผู้วิจัยจึงสนใจที่จะสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง โดยมีกลไกในการทำงานไม่ซับซ้อนทั้งระบบการลำเลียง และระบบในการแลกเปลี่ยนความร้อนสู่อนุภาคของชีวมวลซึ่งเดิมมีการทำงานคล้ายเตาปฏิกรณ์ชนิดฟิกซ์เบด โดยใช้ลักษณะการทำงานแบบเตาปฏิกรณ์มูฟวิ่งเบดและให้ความร้อนทางอ้อมด้วยการใช้ท่อกาลักความร้อนชนิดวงแหวนแทนผนังเตาปฏิกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับอนุภาคชีวมวลเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ให้มีความสม่ำเสมอและทำให้ภายในเตาปฏิกรณ์มีสภาวะอากาศเฉื่อยเนื่องจากไม่มีการใช้ของไหลตัวกลางเข้าสู่ระบบ มีระบบลำเลียงชีวมวลป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์และอุปกรณ์เก็บชีวมวลหลังเสร็จสิ้นกระบวนการซึ่งมีกลไกไม่ซับซ้อนเพื่อให้การทำงานของเตาปฏิกรณ์สามารถดำเนินกระบวนการไปโดยไม่ต้องหยุดเพื่อเก็บชีวมวลทอรีไฟร์เป็นระยะเวลานานอย่างเช่นเตาปฏิกรณ์เทอรโมไซฟอนเดิมหรือเตาปฏิกรณ์ชนิดฟิกซ์เบด

การทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นมีตัวแปรหลายอย่างซึ่งส่งผลต่อกระบวนการและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน, มวลของชีวมวล อุณหภูมิของกระบวนการ ระยะเวลากระบวนการ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่น ดังนั้นการออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เหล่านี้เพื่อพัฒนาเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มผลผลิตในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นหลังจากสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นต้นแบบแล้วนอกจากการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์แล้วจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทั้งคุณลักษณะทางความร้อน, อัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์, การสูญเสียพลังงาน

ภายในระบบของเตาปฏิกรณ์ และสมดุลพลังงานเพื่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว ว่าส่งผลต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์อย่างไร [7]

โครงการวิจัยนี้จึงสนใจจะทำการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง เพื่อทำการทดสอบการใช้งาน โดยใช้ฟางข้าวสับละเอียดเป็นตัวอย่างในการทดสอบ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น คือ ค่าความร้อน (HHV) ผลผลิตเชิงมวล (Mass yield) ค่าความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) ความความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) และ ผลได้ของพลังงาน (Energy yield) เทียบกับเตาปกิกรณ์ชนิดอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อตรวจสอบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ ศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ และระบุอัตราการให้ความร้อนของแต่ละอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในสภาวะการศึกษา คือ 230 และ 270 องศาเซลเซียส

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

1.2.2 เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

1.2.3 เพื่อทดสอบสมบัติของเชื้อเพลิง

1.2.4 เพื่อศึกษาอัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนที่ดีของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนจะช่วยปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน และการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคของชีวมวลให้ดีขึ้น และส่งผลให้เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ใช้ชีวมวลฟางข้าวสับละเอียดในการทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

1.4.2 ใช้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนกับเตาปฏิกรณ์

1.4.3 ทำการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 230 และ 270 องศาเซลเซียส

1.4.4 สารทำงานภายในท่อเทอร์โมไซฟอน คือ DOWNTHERM A

1.4.5 ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นทรงประบอกซ้อนกันโดยเติมสารทำงานระหว่างท่อภายในและภายนอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายนอกและภายในคือ 0.26 และ 0.16 เมตร ตามลำดับ ท่อส่วนควบแน่นยาว 0.6 เมตร ส่วนทำระเหย 0.3 เมตร

1.4.6 ระยะเวลาในการผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์ คือ 15, 25 และ 35 นาที ระยะเวลากระบวนการทอรีแฟคชั่นสำหรับการทดลองคือ 45, 75 และ 105 นาที ตามลำดับ

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลสำหรับการออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

1.5.2 สร้างระบบการป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน ระบบการให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ และอุปกรณ์เก็บชีวมวลหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ

1.5.3 ทำการทดลองทอรีไฟร์ฟางข้าวสับละเอียดตามสภาวะที่กำหนด แล้วนำถ่านทอรีไฟร์มาทดสอบหาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

1.5.4 ศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเตาและศึกษาอัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ในแต่ละอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น

1.5.4 วิเคราะห์ผลการทดลองและเขียนรายงานสรุปการวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.6.1 การทดลองถูกดำเนินด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale)

1.6.2 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องถูกสร้างโดยอาศัยหลักการทำงานของเตาทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบด และดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่นภายใต้บรรยากาศเฉื่อย (Non-Oxydative pyrolysis)

1.7 ความจำกัดของการวิจัย

สร้างเตาทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง ใช้ฟางข้าวสับละเอียดเป็นตัวอย่างในการทดลอง และนำชีวมวลทอรีไฟร์มาทดสอบหาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 ชีวมวล (Biomass) คือ อินทรียวัตถุซึ่งได้มาจากพืชหรือสัตว์ที่มีชีวิตหรือเคยมีชีวิตมาก่อน ไม่ใช่ฟอสซิล หรือ อินทรียวัตถุซึ่งผ่านย่อยสลายโดยจุลินทรี รวมถึงผลผลิต ของเหลือจากการเกษตร การป่าไม้ และอุตสาหกรรม

1.8.2 ทอรีแฟคชั่น (Torrefaction) คือ กระบวนการทางเคมีความร้อนซึ่งให้ความร้อนอย่างช้า ๆในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อยและคงสภาพไว้

1.8.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น (Torrefaction reactor) เตาปฏิกรณ์สำหรับดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่น

1.8.4 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบด (Moving bed torrefaction reactor) คือ เตาทอรีแฟคชั่นที่ชีวมวลถูกเคลื่อนที่เข้าสู่เตาและมีการให้ความร้อนภายในเตา โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของชีวมวลขึ้นอยู่กับระยะเวลาของกระบวนการและอัตราการผลิตที่ต้องการ

1.8.5 ท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน (Two-phase closed thermosyphon) คือ อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงช่วยในการทำงาน เป็นอุปกรณ์ที่ส่งผ่านความร้อนได้ดีในแนวตั้งฉากกับแนวระดับและกระจายความร้อนได้สม่ำเสมอตลอดท่อ

1.8.6 สารระเหย (Volatile) สารจำพวกกรดซึ่งถูกปลดปล่อยเมื่อพันธะเคมีสลายตัวด้วยความร้อน

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.9.1 ได้เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องสาหรับชีวมวลสับละเอียดจากฟางข้าว

1.9.2 ได้ข้อมูลคุณสมบัติเชื้อเพลิงของชีวมวลฟางข้าวสับละเอียดหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

1.9.3 ได้ข้อมูลอุณหภูมิบริเวณต่าง ๆ ภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง เพื่อนำไปศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์และทราบอัตราการให้ความร้อนของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่กำหนด

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ชีวมวล

ชีวมวล คือ อินทรียวัตถุซึ่งได้มาจากพืชหรือสัตว์ที่มีชีวิตหรือเคยมีชีวิตมาก่อน ไม่ใช่ฟอสซิล หรือ อินทรียวัตถุซึ่งผ่านย่อยสลายโดยจุลินทรี รวมถึงผลผลิต ของเหลือจากการเกษตร การป่าไม้ และอุตสาหกรรม [8, 9] ชีวมวลมีแหล่งที่มาดังนี้ [6]

แหล่งการเกษตร อาหารธัญพืช, กากชานอ้อย, ซังข้าวโพด, ฟางข้าว, เปลือกเมล็ด เป็นต้น

แหล่งการป่าไม้ ต้นไม้, เศษไม้, ไม้และเปลือกไม้, ขี้เลื่อย เป็นต้น

แหล่งเทศบาล โคลนจากสิ่งปฏิกูล, ขยะอาหาร, ขยะกระดาษ, เศษวัสดุจากการตัดแต่งสวน เป็นต้น

แหล่งกลุ่มพืชพลังงาน ต้นวิลโล่, หญ้าสวิส, อัลฟาฟ่า, ข้าวโพด, คาโนลา, ถั่วเหลืองและกลุ่มพืชน้ำมัน

แหล่งชีววิทยา ซากสัตว์, พืชหรือสัตว์น้ำ, สิ่งหลงเหลือทางชีววิทยา

โดยทั่วไปชีวมวลประเภทพืชที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้นั้นถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ กลุ่มพืชประเภทไม้ลำต้นอ่อน (Herbaceous biomasses) และ กลุ่มพืชประเภทไม้ลำต้นแข็ง (Woody biomasses) ที่มีวัฏจักรชีวิตสั้นซึ่งแบ่งออกเป็นไม้เนื้ออ่อน (Soft wood, Coniferous) และไม้เนื้อแข็ง (Hard wood, Deciduous) โดยที่พืชแต่ละกลุ่มนั้นมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. พืชประเภทไม้ลำต้นอ่อน มีลักษณะลำต้นที่อ่อน หรือ มีความแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่น ฟางข้าว อ้อย ข้าวฟ่าง และอื่น ๆ อีกมากมาย พืชประเภทนี้สามารถปลูกเพื่อเป็นแหล่งพลังงานได้ตลอดทั้งปีเนื่องมาจากแทบไม่ต้องควบคุมเกี่ยวกับวัชพืช ทนความแห้งแล้ง ลดการกัดกร่อนของดิน [9]

2. พืชประเภทไม้ลำต้นแข็ง เป็นกลุ่มพืชที่มีวัฏจักรในการเพาะปลูกสั้น โดยใช้เวลาประมาณ 3 - 10 ปีต่อวัฏจักร ยกตัวอย่างเช่น ต้นวิลโล่ ยูคาลิปตัส เป็นต้น สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้อแข็งสามารถที่จะแตกหน่อจากตอไม้หลังจากที่ผ่านการเก็บเกี่ยว

ไปแล้วและยังมีปริมาณเถ้าน้อยกว่าไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้ออ่อนก็สามารถหาได้ง่ายตามโรงงานแปรรูปไม้ทั่วไป [10-12]

2.1.1 ชีวมวลขยะ (Waste biomass)

ชีวมวลขยะเป็นชีวมวลอันดับรองซึ่งได้มาจากชีวมวลหลักอย่างเช่น ต้นไม้ ผัก เนื้อ ในระหว่างกระบวนการการผลิตหรือใช้ที่แตกต่างกัน ขยะเทศบาลชนิดแข็ง (Municipal solid waste, MSW) เป็นแหล่งสำคัญสำหรับชีวมวลขยะ ส่วนมากเป็นเศษอาหาร เศษหญ้าหรือเศษกิ่งไม้จากการตัดแต่งสวน เศษกระดาษ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้ ส่วน MSW ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น พลาสติก แก้ว เหล็ก จะไม่ถูกพิจารณาเป็นชีวมวลเรียกว่า RDF (Refuse derived fuel) นอกจากนี้ยังมีขี้เลื่อยซึ่งเป็นขยะที่หลงเหลือจากโรงเลื่อยไม้ องค์ประกอบและค่าความร้อนของชีวมวลขยะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 [1]

ตารางที่ 1 ตัวอย่างองค์ประกอบของชีวมวลขยะ

ชีวมวล	ความชื้น (wt.%)	สารอินทรีย์ (dry wt.%)	เถ้า (dry wt.%)	HHV (MJ/dry kg)
ปุ๋ยปศุสัตว์ (Cattle manure)	20 - 70	76.5	23.5	13.4
ของเสีย (Sewage)	90 - 98	73.5	26.5	19.9
RDF	15 - 30	86.1	13.9	12.7
ขี้เลื่อย (Sawdust)	15 - 60	99.0	1.0	20.5

2.1.2 ชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Biomass)

ชีวมวลส่วนใหญ่เป็นแบบลิกโนเซลลูโลส มีองค์ประกอบหลักเป็น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ตัวอย่างที่ดีของชีวมวลลิกโนเซลลูโลส คือ พืชไม้ ยกตัวอย่างเช่น ต้นไม้ ต้นไม้พุ่มเตี้ย กระบองเพชรและเถาวัลย์ ลำต้นและใบของต้นไม้เป็นแหล่งชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่ใหญ่ที่สุดซึ่งมีสัดส่วนของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ 2 [13]

ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสถูกปลูกเพื่อให้เป็นพืชสำหรับผลิตพลังงานโดยเฉพาะ เรียกพืชกลุ่มนี้ว่า กลุ่มพืชพลังงาน (Energy crop) เป็นกลุ่มพืชที่ใช้ระยะเวลาเพาะปลูกสั้นและไม่ต้องการปุ๋ยหรือต้องการน้อยมากทำให้สามารถคืนทุนได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการผลิตพลังงานกลุ่มพืชไม้ที่นิยมใช้กัน

อย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น ต้นมิสแคนทัส ต้นวิลโล่ หญ้าสวิส เป็นต้น พืชเหล่านี้มีปริมาณพลังงานสูงเมื่อเทียบกับหน่วยพื้นที่และต้องการพลังงานในการเพาะปลูกต่ำมาก

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของชีวมวลลิกโนเซลลูโลส

พืช	ลิกนิน (%)	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)
พืชผลัดใบ (Deciduous plants)	15 - 25	40 - 44	15 - 35
พืชจำพวกสน (Coniferous plants)	25 - 35	40 - 44	20 - 32
ต้นวิลโล่ (Willow)	25	50	19
ต้นสนลาช (Larch)	35	26	27

2.2 กระบวนการเคมีความร้อน

กระบวนการเคมีความร้อน หรือ อุณหเคมี ถูกใช้ในการแปรสภาพของชีวมวลแบบลิกโนเซลลูโลส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าว ทำให้สามารถนำไปใช้โดยตรงได้ง่ายขึ้น หรือเพิ่มมูลค่าของเชื้อเพลิงชีวมวล [10, 14, 15] โดยมีทั้งสิ้น 4 กระบวนการด้วยกัน ดังนี้

1. การเผาไหม้ (Combustion) เป็นการนำชีวมวลไปเผาโดยตรงในสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจนซึ่งไม่ได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพหรือมูลค่าของเชื้อเพลิงแต่อย่างใด ผลลัพธ์ที่ได้มีเพียงความร้อนเท่านั้น [6]

2. ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนชีวมวลไปสู่ผลผลิตสามชนิดสามสถานะด้วยกันคือ ถ่านในสถานะของแข็ง ไบโอออยในสถานะของเหลว และก๊าซ โดยกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับสัดส่วนของผลผลิตที่ต้องการ เช่น การไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) จะให้ผลผลิตที่เป็นไบโอออยสูง การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) จะให้ผลผลิตที่เป็นถ่านสูง เป็นต้น [15] ไบโอออยที่ได้จากกระบวนไพโรไลซิสหากนำไปปรับปรุงคุณภาพยังสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินได้อีกด้วย [16-19]

3. แก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่มีวัตถุประสงค์คือต้องการให้ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการมีปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สูง ซึ่งส่วนผสมของแก๊สลักษณะนี้เรียกว่า ซินแก๊ส (Syngas) เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิขณะดำเนินการ

สูงกว่าไพโรไลซิสและต้องการสภาวะบรรยากาศที่มีออกซิเจนเพียงบางส่วนเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ [19]

4. ไฮโดรเทอมอล (Hydrothermal process) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่แตกต่างจากวิธีอื่น คือ กระบวนการจะดำเนินภายใต้สภาวะของเหลวด้วยน้ำที่มีอุณหภูมิแบบซูเปอร์คริติคอล (Supercritical water temperature) จะช่วยให้ชีวมวลแบบลิกโนเซลลูโลสแตกตัวออกเป็นน้ำมันดิบหรือผลิตภัณฑ์ก๊าซ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน [20]

จากข้อมูลดังที่กล่าวมาสามารถสรุปกระบวนการทางเคมีความร้อนทั้งสี่ประเภทและผลผลิตที่ได้ของแต่ละกระบวนการ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลผลิตของกระบวนการเทอร์โมเคมิคอลแต่ละประเภท

ชนิดกระบวนเทอร์โมเคมิคอล	ผลผลิต
1. การเผาไหม้ (Combustion)	ความร้อน
2. ไพโรไลซิส (Pyrolysis)	ถ่าน, ไบโอออย, ก๊าซ
3. แก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification)	ก๊าซ
4. ไฮโดรเทอมอล (Hydrothermal process)	ไบโอออย, ก๊าซ

2.3 กระบวนการทอรีแฟคชั่น

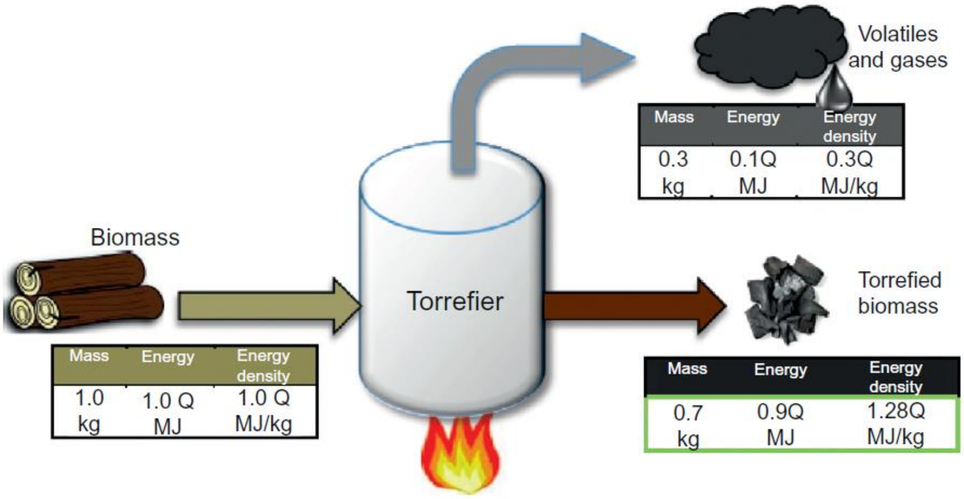
กระบวนการทอรีแฟคชั่น (Torrefaction process) คือ "กระบวนการทางเคมีความร้อนซึ่งดำเนินภายใต้บรรยากาศเฉื่อยหรือสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด (2 - 3%) ถูกให้ความร้อนอย่างช้า ๆ ในช่วงอุณหภูมิเฉพาะ และคงไว้ที่สภาวะดังกล่าวในช่วงเวลาที่ส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสสลายตัวโดยสมบูรณ์ ขณะที่ผลผลิตของแข็งที่ได้มีมวลมากและปริมาณพลังงานสูงสุด" [21]

ช่วงอุณหภูมิสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นอยู่ในช่วง 200 - 300 องศาเซลเซียส [13] ช่วงอุณหภูมิอื่น ๆ ถูกซึ่งถูกแนะนำโดยนักวิจัย Basu P. แสดงไว้ในตารางที่ 4 [1] แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดไม่ควรเกิน 300 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเกินกว่า 300 องศาเซลเซียสจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาดีโวลาไทซ์เซชั่น (Devolatilization) และ คอร์บอไนซ์เซชั่น (Carbonization) ของโพลีเมอร์เกินกว่าความต้องการสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น [13] นอกจากนี้ที่ช่วงอุณหภูมิ 300 - 320 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวทำให้เกิดทาร์ (Tar) จึงเป็นเหตุให้จำกัดอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่นไม่ให้เกิน 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 ช่วงอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่น

นักวิจัย	ช่วงอุณหภูมิ (°C)
Arias et al (2008) [22]	220 - 300
Prins (2006) [23]	225 - 300
Pimchuai et al. (2010) [24], Prins et al. (2006) [23]	230 - 300
Bergman et al. (2005) [13], Rouset et al. (2011) [25]	200 - 300

ภาพที่ 7 แสดงกระบวนการทอรีแฟคชั่นอย่างง่าย โดยสังเกตได้ว่ามวลและพลังงานของชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นและกลายเป็นผลผลิตทอรีไฟร์ (Torrefied product)



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของมวลและพลังงานหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น*[6]*

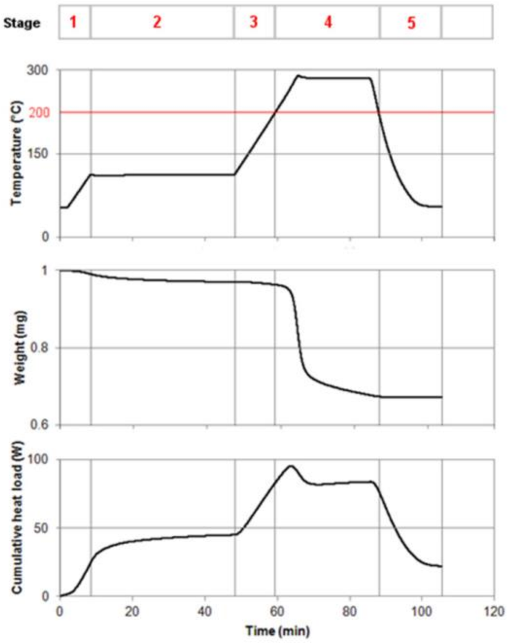
ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นขั้นตอนการทอรีแฟคชั่นของกิ่งต้นเมเปิ้ลและมวลที่สูญเสียของแต่ละขั้นตอน ในช่วง A, B, C กิ่งต้นเมเปิ้ลจะแห้งขึ้นตามลำดับเนื่องจากช่วงนี้ความชื้นจะถูกขับออกไป จากนั้นในช่วง D, E, F กิ่งต้นเมเปิ้ลจะเริ่มเปลี่ยนสีและกลายเป็นถ่าน

Raw sample 20°C	Air dried at 70°C	Bone dried at 140°C	Mildly torrefied at 200°C	Medium torrefied at 250°C	Severe torrefied at 310°C
Retained mass= 100%	79%	58%	54%	43%	28%
A	B	C	D	E	F

ภาพที่ 8 กระบวนการทอรีแฟคชั่นของกิ่งเมเปิ้ล [6]

2.3.1 กลไกของกระบวนการทอรีแฟคชั่น

กระบวนการทอรีแฟคชั่นเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการไพโรไลซิส (Slow, Mild pyrolysis) โดยรวมแล้วกระบวนการทอรีแฟคชั่นมี 5 ขั้นตอน กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาซึ่งแสดงขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่นดังกล่าว แสดงในภาพที่ 9

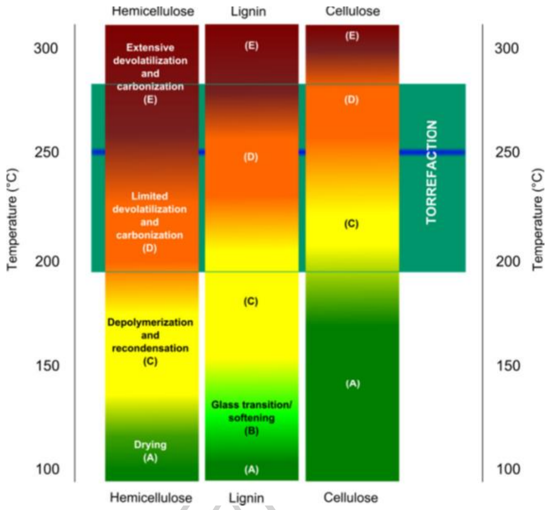


ภาพที่ 9 ขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่น *[13]*

ขั้นตอนที่ 1 ชีวมวลจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส จากนั้นน้ำจะเริ่มระเหยและเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งในขั้นตอนนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจนกว่าน้ำอิสระ (Free water) จะระเหยไปจนหมด เป็นขั้นตอนของการอบแห้งช่วงแรก (Pre-drying) ขั้นตอนที่ 3 เป็นการอบแห้งช่วงท้ายและเป็นช่วงที่อยู่ระหว่างการเพิ่มของอุณหภูมิจาก 100 เป็น 200 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้จะมีการสูญเสียมวลบางส่วน ขั้นตอนที่ 4 เป็นกระบวนการทอรีแฟคชั่นโดยปฏิกิริยาจะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส หากสังเกตจากภาพที่ 9 โดยพิจารณากราฟของน้ำหนักเทียบกับเวลาจะสังเกตเห็นว่าเป็นช่วงที่เกิดการสูญเสียมวลมากที่สุดของทั้งกระบวนการ กระบวนการทอรีแฟคชั่นจะจบลงเมื่ออุณหภูมิเริ่มต่ำลงจากอุณหภูมิสูงสุด (อุณหภูมิสูงสุดจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล) และจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 5 คือขั้นตอนของการทำความเย็น ในขั้นตอนนี้อุณหภูมิจะลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง [4]

กลไกในการย่อยสลายสามารถแบ่งออกได้เป็นสองขั้นตอนด้วยกัน ขั้นตอนแรกในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส เป็นขั้นตอนที่เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว หากสังเกตกราฟของน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิจากภาพที่ 9 จะเห็นว่าเป็นช่วงที่น้ำหนักลดลงจาก 0.97 เป็น 0.75 มิลลิกรัม ขั้นตอนที่สองอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส เป็นขั้นตอนที่เกิดการย่อยสลายช้าดังสามารถสังเกตได้จากกราฟของน้ำหนักเทียบกับอุณหภูมิจากภาพที่ 9 เช่นกัน ในขั้นตอนนี้จะเกิดปฏิกิริยาที่สร้างถ่านและโวลาไทล์ขึ้นมา

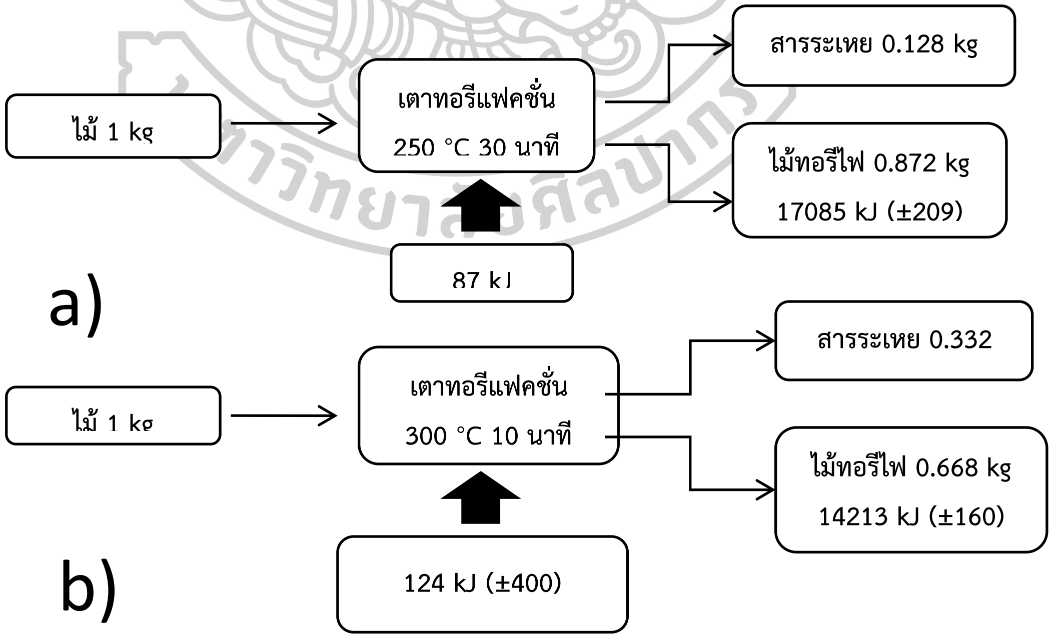
การสูญเสียมวล (Dry matter loss) ส่วนใหญ่จะเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลสมีช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 225 - 300 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สอดคล้องกับช่วงอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่น ขณะที่เซลลูโลสและลิกนินมีช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 305 - 375 องศาเซลเซียส และ 250 - 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [23] เพราะฉะนั้นมวลสูญเสียไปส่วนใหญ่จึงเป็นเฮมิเซลลูโลส มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่มาจากเซลลูโลสและลิกนิน [4] ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของโพลีแซกคาไรและลิกนินในกระบวนการทอรีแฟคชั่น [11]

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

โดยทั่วไปแล้วผลผลิตของกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะมีถ่านและก๊าซ 70 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ไม่มีไบโอออย [26] แต่องค์ประกอบและปริมาณของผลผลิตจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการทอรีแฟคชั่นซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่น ความชื้นของชีวมวล อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาของกระบวนการและขนาดของอนุภาคชีวมวล ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผลผลิตจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่แตกต่างกันสองสภาวะ [23]

จากภาพที่ 11 สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่ต่ำลง และใช้เวลามากขึ้นจะทำให้ผลผลิตมีปริมาณของถ่านมากกว่ากรณีที่มีอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูงกว่า ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นสูงขึ้น ปริมาณของโวลาไทล์จะสูงขึ้นในขณะที่ปริมาณถ่านต่ำลง ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอื่น ๆ จะส่งผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแตกต่างกันออกไป โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีผลกระทบอย่างมากต่อผลผลิตของกระบวนการทอรีแฟคชั่น งานวิจัยของ Ciolkosz D. et al. 2011 [18] พบว่าเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นจาก 230 เป็น 280 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้ปริมาณของเชื้อเพลิงแข็งต่ำลงจากประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 70-75 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าผลผลิตของแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น มีหลายงานวิจัยที่ยืนยันว่าอุณหภูมิมีผลกระทบอย่างมากต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลผลิต [13, 27, 28]

งานวิจัยของ Medic D. [4] มีแนวโน้มลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยของ Ciolkosz D. และ Wallace R. [18] คือผลผลิตของแข็ง (ถ่าน) มีแนวโน้มลดลงในขณะที่แก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงระหว่าง 250-300 องศาเซลเซียส การสูญเสียของผลผลิตของแข็งมีมากกว่าในช่วงระหว่าง 200-250 องศาเซลเซียสอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส หากเพิ่มอุณหภูมิการทอรีแฟคชั่นมากขึ้นจะทำให้การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสสูงขึ้น [1] ส่งผลให้ผลผลิตมวลลดลง (Dry matter loss)

นอกจากนี้กระบวนการทอรีแฟคชั่นจะทำให้อะตอมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นขณะที่อะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง ทำให้อัตราส่วน O/C และ H/C ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนเข้ากระบวนการทอรีแฟคชั่น เนื่องมาจากการปลดปล่อยโวลาไทล์ที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนและไฮโดรเจนสูง (น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์) จึงทำให้พลังงานสูงขึ้น [4]

เมื่ออุณหภูมิกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณพลังงาน (Energy yield) ลดลงด้วยเช่นกัน โดยสามารถสังเกตได้จากสมการที่ 2.1 [4] ซึ่งเป็นสมการหาค่าปริมาณพลังงานของชีวมวล

$$E_{yield}(\%) = (m_{torrefied} / m_{initial})_{dry\ basis} \times (E_{torrefied} / E_{initial}) \times 100 \quad \text{(สมการที่ 2.1)}$$

สังเกตจากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าอัตราส่วน $m_{torrefied}$ /$m_{initial}$ จะแปรผันตรงกับ $m_{torrefied}$ กล่าวคือ เมื่อ $m_{torrefied}$ ลดลง อัตราส่วน $m_{torrefied}$ /$m_{initial}$ ก็จะลดลงด้วย จึงเป็นสาเหตุการลดลงของปริมาณพลังงาน (Energy yield E_{yield}, %) เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่น [4]

ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะส่งผลทำให้เกิดสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้มวลของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการลดลงปริมาณพลังงาน (Energy yield) ลดลง นอกจากนี้การที่เฮมิเซลลูโลสลดลงเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิกระบวนทอรีแฟคชั่น ยังมีผลทำให้ชีวมวลมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) และเพิ่มความสามารถในการต้านทานการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพื่อให้ได้ชีวมวลที่ทนทานต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และมีความไม่ชอบน้ำที่เหมาะสมคือ 250 องศาเซลเซียส [4]

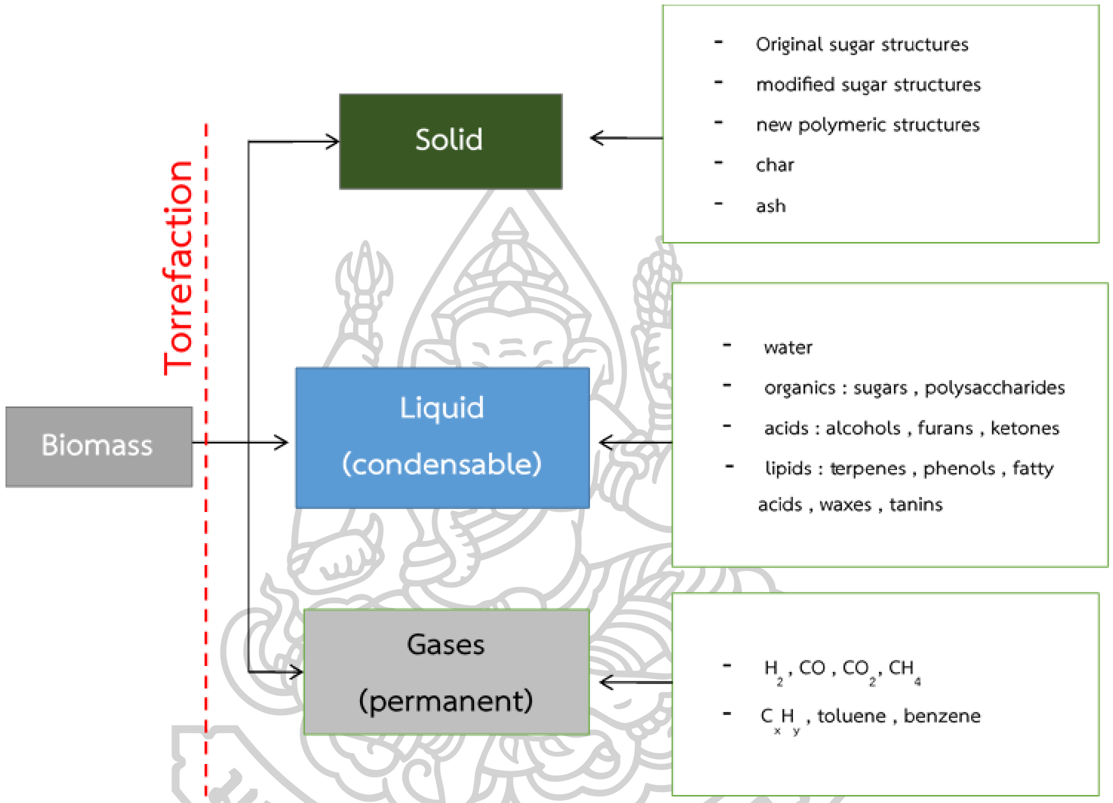
2.3.2.2 ความชื้น

ความชื้นในชีวมวลหมายถึงปริมาณของน้ำอิสระที่อยู่ในชีวมวล น้ำมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอากาศ หรือ ไนโตรเจน เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงกว่า ทำให้ชีวมวลที่มีความชื้นสูงสามารถถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคของชีวมวลได้ดีขึ้น [23] จากการทดลองของ Medic D. [4] ทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นที่ 3%, 22% และ 41% พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้มวลของชีวมวลหลังการทอรีแฟคชั่นลดลง ที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ชีวมวลที่มีความชื้น 41% สูญเสียมวลมากกว่าชีวมวลที่มีความชื้น 3% และ 22% ถึงสามเท่า

จากการที่ความชื้นของชีวมวลมากขึ้นจะทำให้การสูญเสียมวลหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่นมากขึ้นนั้น ย่อมส่งผลต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างอย่างเช่น ค่าปริมาณพลังงาน ค่าพลังงานความร้อน (HHV) ซึ่งได้มีผลการวิจัยระบุว่าหากค่าความชื้นสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนลดลงด้วยเช่นกัน [1] ค่าความชื้นจึงนับได้ว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีส่งผลกระทบอย่างมากต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่น แต่ผลกระทบนั้นยังเป็นรองอุณหภูมิของกระบวนทอรีแฟคชั่นซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุด [13, 27, 28]

2.3.2.3 อัตราการให้ความร้อนและระยะเวลาของกระบวนการ

อัตราการให้ความร้อนและระยะเวลาของกระบวนการจะส่งผลต่อผลผลิตของกระบวนการทอรี-แฟคชั่นเกี่ยวกับสัดส่วนของผลผลิตเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ผลผลิตของกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะแบ่งออกเป็นสามชนิดสามสถานะดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 องค์ประกอบของผลผลิตจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น [13]

หากอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 50 องศาเซลเซียส/นาที) จะทำให้เกิดผลผลิตที่เป็นของเหลวสูง ในทางตรงกันข้ามหากอัตราการให้ความร้อนต่ำ (10-50 องศาเซลเซียส/นาที) [3, 4] ก็จะให้ผลผลิตที่เป็นของแข็งสูง การใช้อัตราการให้ความร้อนสูงและใช้ระยะเวลากระบวนการต่ำจะให้ไบโอออยในปริมาณมาก ซึ่งกระบวนการลักษณะนี้เรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งมีอุณหภูมิกระบวนการประมาณ 500 องศาเซลเซียส แต่ในเอกสารฉบับนี้จะกล่าวถึงกระบวนการทอรีแฟคชั่นเป็นหลัก ซึ่งใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำ คือ 10-50 องศาเซลเซียส/นาที เพื่อให้ได้ผลผลิตที่เป็นของแข็ง (ถ่าน) ในสัดส่วนที่มากขึ้น

ระยะเวลาของกระบวนการมีผลกระทบค่อนข้างน้อยหากเทียบกับอุณหภูมิและความชื้น แต่มีผลกระทบอย่างมากต่อการออกแบบเตาทอรีแฟคชั่น โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ชนิดของชีวมวล คุณสมบัติทางฟิสิกส์ คุณสมบัติทางเคมีและเป้าหมายของการนำผลผลิตไปใช้ ถึงแม้การเพิ่มระยะเวลากระบวนไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลอย่างมีนัยสำคัญ ยกตัวอย่างจากผลการวิจัยโดย Repellin V. et al. [29] ซึ่งมีการสูญเสียมวลเพียง 1-5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นจากการเพิ่มระยะเวลาจาก 20 นาที เป็น 40 นาที แต่การเพิ่มระยะเวลาในบางช่วงอุณหภูมินั้นก็สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการบดได้ ผลการวิจัยของ Arias B. et al. [22] พบว่าการดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียสและพบว่าการเพิ่มระยะเวลาของกระบวนการสามารถเพิ่มความสามารถในการบดได้ นอกจากนี้เมื่ออัตราการให้ความร้อนและระยะเวลาของกระบวนการเพิ่มขึ้นยังมีผลทำให้การสูญเสียมวลของชีวมวลหลังผ่านกระบวนเพิ่มขึ้นอีกด้วย [4]

2.3.2.4 ขนาดอนุภาค

การใช้อนุภาคของชีวมวลขนาดเล็กลงจะมีผลทำให้ชีวมวลมีปริมาณเถ้าสูงขึ้นได้ เนื่องจากชีวมวลมีอนุภาคของดินเกาะอยู่ซึ่งดินมีส่วนประกอบของอนินทรีย์ ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นแล้วจะเปลี่ยนกลายเป็นเถ้า ซึ่งหากแยกเอาอนุภาคขนาดเล็กออกจะสามารถลดปริมาณเถ้าของชีวมวลลงได้ นอกจากนี้การที่ปริมาณเถ้าสูงยังมีแนวโน้มทำให้ค่าพลังงานความร้อนของถ่านที่ได้ลดลงอีกด้วย [30]

ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้เกี่ยวกับความชื้นที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคมีผลให้มวลของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นลดลง ในกรณีของขนาดอนุภาคก็เช่นเดียวกันเมื่ออนุภาคของชีวมวลมีขนาดลดลงจะทำให้มีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น จึงเป็นผลให้มวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นลดลงและมีพลังงานความร้อนมากขึ้น เหมือนกับผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่น [4]

2.3.2.5 ชนิดของชีวมวล

ชนิดของชีวมวลเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่น ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่าการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นและทำให้ชีวมวลมีการสูญเสียมวลเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น เพราะฉะนั้นชีวมวลที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากจะมีการสูญเสียมวลมากด้วยเช่นกัน ในการทดลองนำไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสใกล้เคียงกันมาผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

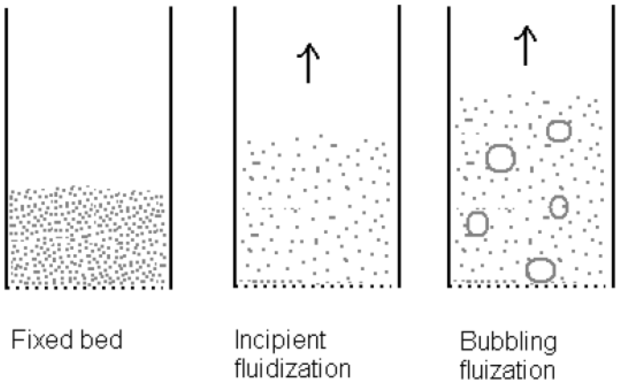
มวลของผลผลิตทอรีไฟร์ที่ได้ก็มีค่าแตกต่างกัน [23] ไม้เนื้อแข็งจะสูญเสียมวลมากกว่าไม้เนื้ออ่อน เพราะเฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็งมีปริมาณของไซเลน (xylan) 80-90% ในขณะที่ไม้เนื้ออ่อนมีปริมาณไซเลนเพียง 15-30%

ปริมาณไซเลนของเฮมิเซลลูโลสมีปฏิกิริยาต่อช่วงอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชั่นอย่างมาก มีการสลายตัวรวดเร็วกว่าองค์ประกอบของแข็งอื่น ๆ ในชีวมวล [21, 23] ด้วยเหตุนี้ปริมาณของไซเลนจึงส่งผลกระทบมากกว่าปริมาณของเฮมิเซลลูโลส

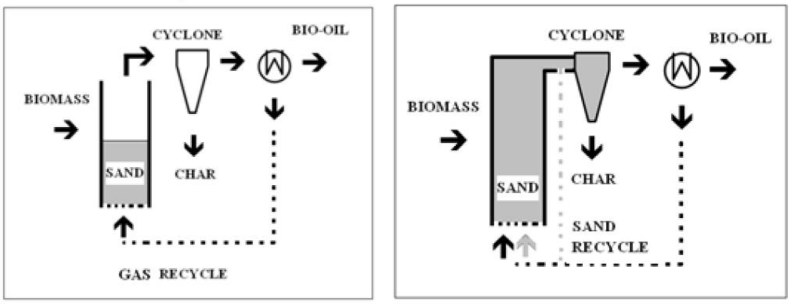
2.4 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น

การเลือกใช้เตาทอรีแฟคชั่นที่เหมาะสมกับชีวมวลนั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่น ต้องอาศัยเกณฑ์หลายประการ เช่น อุณหภูมิของกระบวนการ ความจุของเตาปฏิกรณ์ และระยะเวลาของกระบวนการ สิ่งที่สำคัญคือกลไกในการถ่ายเทความร้อนสู่ชีวมวล เพราะฉะนั้นลักษณะเฉพาะของชีวมวลจึงมีผลอย่างมากต่อการออกแบบและปรับแต่งเตาทอรีแฟคชั่นให้เหมาะกับชีวมวลที่จะนำมาเข้าแปรรูปด้วยกระบวนการทอรีแฟคชั่น จึงมีการพัฒนาเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นขึ้นมาหลายแบบ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน

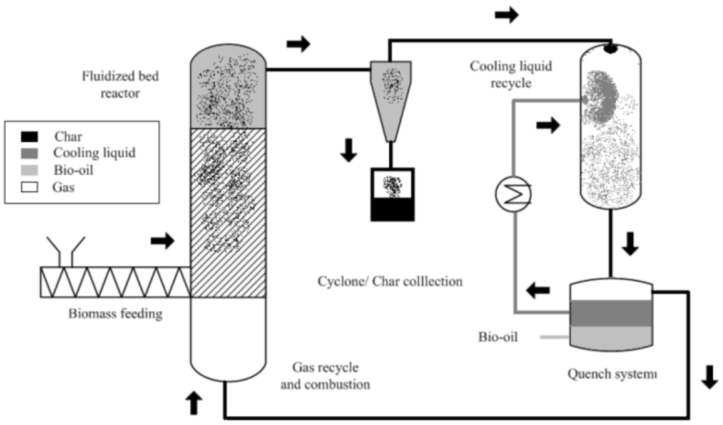
2.4.1 เตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed reactor) เป็นเตาปฏรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างมากสำหรับการแปรรูปชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อน ครอบคลุมทั้งการเผาไหม้ แก๊สซิฟิเคชั่น ทอรีแฟคชั่น ทำงานโดยการใช้ก๊าซเป็นตัวพาความร้อนไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอนุภาคชีวมวล หรือใช้ทราย วัสดุของแข็งนำความร้อนร่วมกับก๊าซตัวกลางเพื่อให้ทำงานคล้ายของไหลและแลกเปลี่ยนความร้อนกับอนุภาคของชีวมวล โดยในกรณีที่ใช้ก๊าซไนโตรเจนร่วมกับทราย ก๊าซไนโตรเจนจะพัดทรายให้ลอยตัวขึ้นดังภาพที่ 13 ทำให้ทรายมีพฤติกรรมคล้ายของไหลและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคของชีวมวลและทราย ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 ลักษณะพฤติกรรมของทรายภายในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์ [31]



ภาพที่ 14 การทำงานของเตาฟลูอิไดซ์เบดซึ่งมีการวนนำทรายกลับเข้าสู่เตาเป็นวัฏจักร [32]

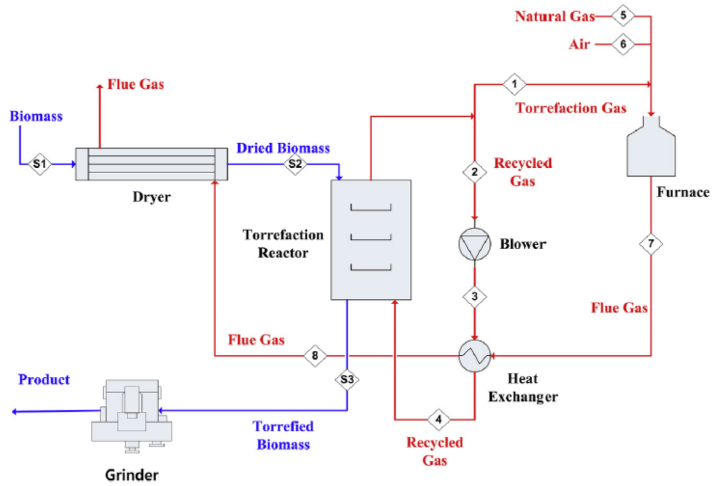


ภาพที่ 15 ลักษณะการทำงานของเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด [2]

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิไดซ์เบดมีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีแต่อนุภาคของชีวมวลต้องมีขนาดเล็ก เพื่อให้ชีวมวลสามารถมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับทรายและลอยขึ้นไปแลกเปลี่ยน

ความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ได้ ขนาดอนุภาคประมาณ 3 มิลลิเมตร จนถึง 250 ไมโครเมตรขึ้นอยู่กับขนาดของเตาปฏิกรณ์ โดยอุณหภูมิของกระบวนการประมาณ 260-300 องศาเซลเซียส ระยะเวลาประมาณ 15-60 นาที และเนื่องจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นต้องควบคุมให้อัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 10-50 องศาเซลเซียส/นาที [3, 33] ข้อดีของเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดคือเตามีความเสถียรและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทำให้ชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทั่วถึงมากกว่าเตาปฏิกรณ์ชนิดฟิกซ์เบดและมูฟวิ่งเบด [6] แต่ในกรณีที่ใช้ทรายร่วมด้วยจะทำให้มีอนุภาคของทรายติดกับอนุภาคของชีวมวลซึ่งยากต่อการแยกออกเป็นสาเหตุของปริมาณเถ้าที่สูงขึ้น จะสังเกตเห็นว่าในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดมีการใช้ของไหล (carrier gas) ทำให้เกิดสภาวะเฉื่อยและช่วยเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวลดังภาพที่ 15

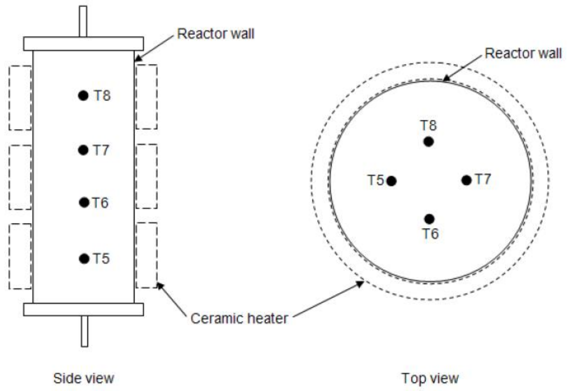
2.4.2 เตาปฏิกรณ์มูฟวิ่งเบด (Moving bed reactor) เป็นเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่อนุภาคของชีวมวลถูกเคลื่อนที่เข้าสู่เตาและมีการให้ความร้อนภายในเตา โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของชีวมวลขึ้นอยู่กับระยะเวลาของกระบวนการและอัตราการผลิตที่ต้องการ ยกตัวอย่างการออกแบบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบดของ Park C. et al. [7] โดยให้ความร้อนด้วยการนำไอเสียมาใช้เป็นของไหลในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอนุภาคของชีวมวลดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบดโดยใช้ก๊าซไอเสียช่วยถ่ายเทความร้อน [7]

จากภาพที่ 16 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบดอยู่ในแนวตั้ง แต่เตาชนิดนี้สามารถทำงานได้ทั้งแนวตั้ง แนวนอน และเอียง การเคลื่อนที่ของอนุภาคชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์จะใช้แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) หรือจากแรงภายนอกโดยเครื่องจักรหรือการสั่นก็ได้เช่นกัน การแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลสัมผัสกับชีวมวล ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนความร้อนจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชีวมวลและก๊าซที่ใช้ในกระบวนการ [6] เตาทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบดมีการป้อนชีวมวลแบบต่อเนื่องและชีวมวลมีขนาดใหญ่ได้ เช่นจาก กรณีของ Park C. et al. [7] มีอัตราการผลิต 1.45 กิโลกรัมต่อวินาที ขนาดชีวมวล 10x30x50 มิลลิเมตร และใช้แก๊สที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสในกระบวนการ จะเห็นว่าเตาปฏิกรณ์นี้ต้องมีการกำหนดอัตราการผลิตด้วยเนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาที่ชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์

2.4.3 เตาฟิกซ์เบด (Fixed bed reactor) เป็นเตาทอรีแฟคชั่นที่ทำงานคล้ายกับเตาปฏิกรณ์แบบมูฟวิ่งเบดแต่อนุภาคชีวมวลจะไม่มีการเคลื่อนที่ ให้ความร้อนจากภายนอกหรืออาจมีการใช้ของไหลเป็นตัวกลางช่วยสร้างสภาวะบรรยากาศเฉื่อยและช่วยในการถ่ายเทความร้อน ยกตัวอย่างเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดที่มีการใช้ของไหลให้ความร้อนภายในและมีเซรามิกซ์ให้ความร้อนจากภายนอกดังภาพที่ 17 ซึ่งเป็นการทดลองของ Medic D. [4]



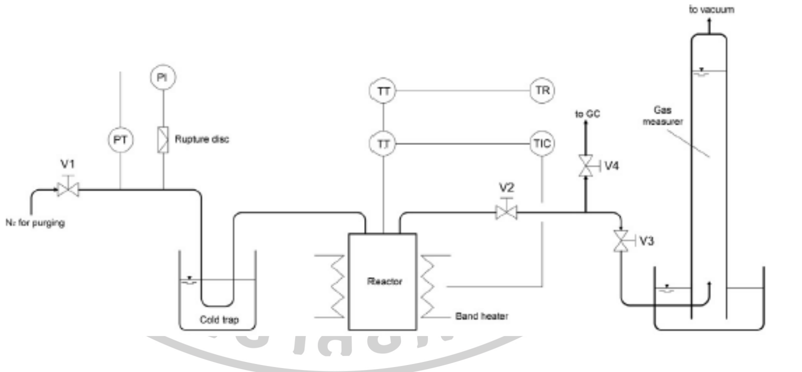
ภาพที่ 17 ลักษณะของเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดของ Medic D. [4]

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดของ Medic D. [4] ได้ปรับปรุงให้มีการกระจายความร้อนได้ดีขึ้น โดยใช้เซรามิกให้ความร้อนภายนอกสามจุด มีการใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อช่วยสร้างสภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อยและช่วยให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น ภาพที่ 17 แสดงตำแหน่งของจุดวัด

อุณหภูมิเพื่อตรวจดูการกระจายตัวของอุณหภูมิ จากการตรวจสอบของ Medic D. พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิแต่ละจุดมีความใกล้เคียงกันมาก [4]

เตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดมีลักษณะการทำงานที่คล้ายกับเตาแบบมูฟวิ่งเบด คือมีอุณหภูมิของกระบวนการประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส [4] และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านแก๊สที่เป็นตัวกลางหรือร่วมกับแหล่งความร้อนภายนอกและสามารถใช้อนุภาคขนาดใหญ่ได้เช่นกัน แต่เตาชนิดนี้ไม่ใช้การป้อนชีวมวลแบบต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นระยะเวลาของกระบวนการจึงขึ้นอยู่กับขนาดของชีวมวลและเตา

2.4.4 ทอรีแฟคชั่นแบบเปียก (Wet torrefadtion) ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนภายใต้น้ำที่ความดันสูง เพราะฉะนั้นจึงถือเป็นจุดเด่นของเตาทอรีแฟคชั่นแบบเปียก คือ สามารถดำเนินกระบวนการได้โดยไม่ต้องทำการอบไล่น้ำก่อนเนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในน้ำ เพราะฉะนั้นจึงสามารถทำการทอรีแฟคชั่นชีวมวลที่มีความชื้นสูงได้ [6] ภาพที่ 18 แสดงระบบของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเปียกของ Basso D. [34] มีอุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส ความดันสูงสุด 140 บาร์

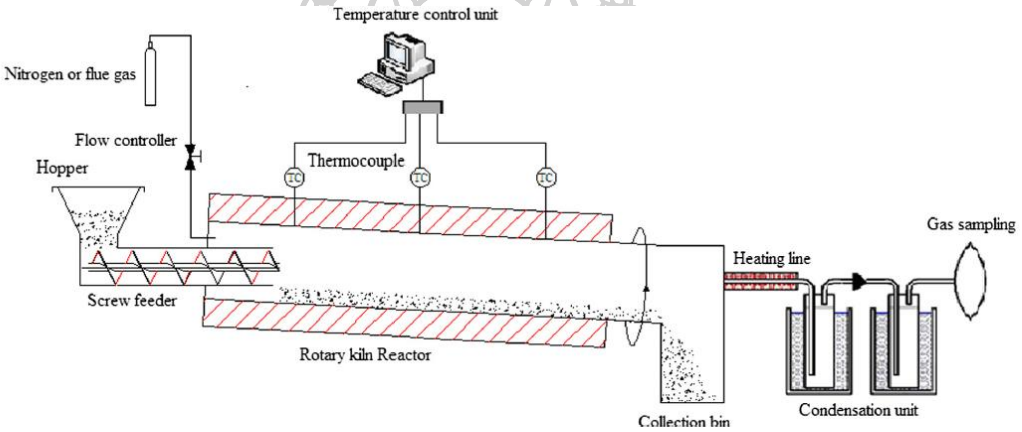


ภาพที่ 18 ระบบการทำงานของเตาทอรีแฟคชั่นแบบไฮโดรเทอร์มอล และรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิปฏิบัติการต่าง ๆ [34]

ปกติกระบวนการทอรีแฟคชั่นแบบแห้งจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 220-300 องศาเซลเซียส [4] สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นแบบเปียกจะเห็นว่าสามารถปฏิบัติได้ที่ 175 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ที่อุณหภูมิเดียวกันระยะเวลาเท่ากันชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นแบบเปียกจะมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น 11.4-11.6 เปอร์เซ็นต์ ใช้พลังงานในการบดน้อยลง 13.3-16 เท่า และมีปริมาณเถ้าน้อยกว่า [35] [36] พบว่าที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ชีวมวลมิสเคนทัส (Miscanthus) ที่ผ่านการทอรีไฟล์ด้วยวิธีทอรีแฟคชั่นแบบเปียกมีค่าพลังงานความร้อน 26.9 กิกกะจูลต่อลูกบาศก์

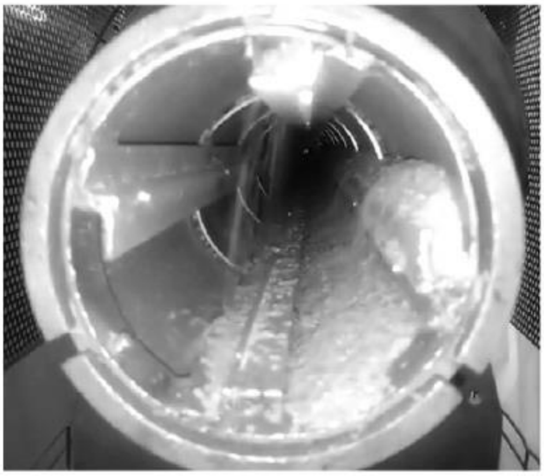
เมตร ซึ่งมากกว่าชีวมวลเดิมและชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นแบบแห้งที่มีค่าพลังงานความร้อน 15.7 และ 16.7 กิกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้หากเพิ่มระยะเวลากระบวนการการทอรีแฟคชั่นแบบเปียกจะทำให้ปริมาณเถ้าลดลงอีกด้วย [36]

2.4.5 เตาปฏิกรณ์โรตารี่ คลิน (Rotary klin) มีลักษณะการป้อนชีวมวลคล้ายคลึงกับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมูฟวิ่งเบดคืออาศัยมุมเอียงของเตาและแรงโน้มถ่วงของโลกหรือการสั่นสะเทือนช่วยในการป้อนชีวมวล เริ่มจากชีวมวลจากส่วนป้อน (Hopper) จะเข้าสู่ท่อซึ่งหมุนและทำองศากับแนวระนาบทำให้ชีวมวลเคลื่อนที่ไปตามท่อแล้วผ่านกระบวนการไล่น้ำจนถึงการทำความเย็นจนกระทั่งหล่นลงในถังบรรจุชีวมวลดังภาพที่ 19 [37]



ภาพที่ 19 ระบบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารี่ คลิน [37]

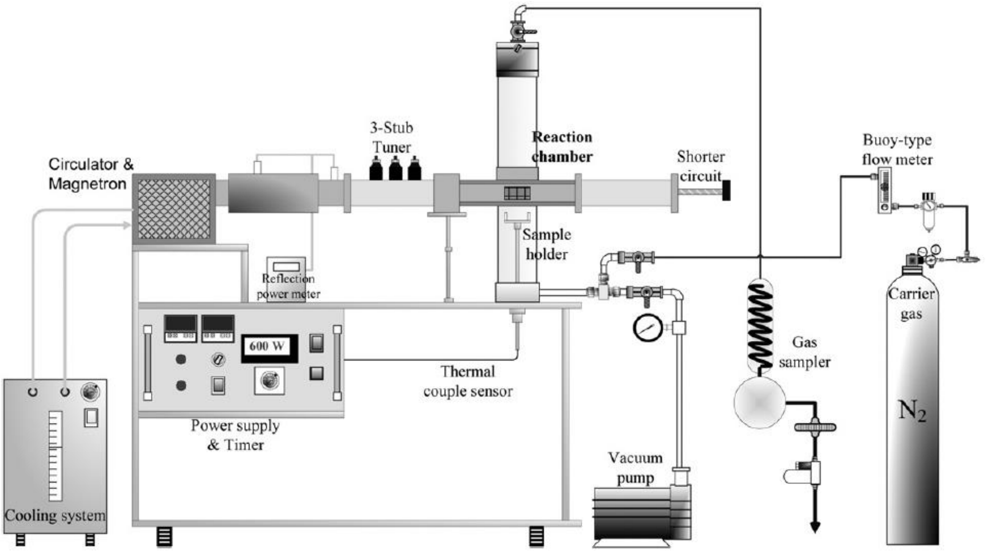
เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ให้ความร้อนโดยอุปกรณ์ให้ความร้อนที่อยู่รอบท่อ [38] หรือใช้แก๊สไนโตรเจนร่วมด้วยเพื่อให้เกิดสภาวะเฉื่อยและมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้น [37] ใช้อุณหภูมิและขนาดอนุภาคคล้ายกับเตาแบบมูฟวิ่งเบด แต่เตาชนิดนี้จุชีวมวลไว้เพียงบางส่วนของเตาเท่านั้นคิดเป็นประมาณ 36-40 องศาเซลเซียสเทียบกับมุมโดยรอบของท่อ ดังภาพที่ 20 ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล [38] เพื่อให้ชีวมวลเคลื่อนได้อย่างราบลื่น ระยะเวลาของกระบวนการจะขึ้นอยู่กับความเอียงของท่อเทียบกับแนวระนาบ และความเร็วรอบของเตา หากความเร็วรอบและมุมเอียงเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าระยะเวลากระบวนการลดลง [38]



ภาพที่ 20 ลักษณะของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารี่ คลิน [38]

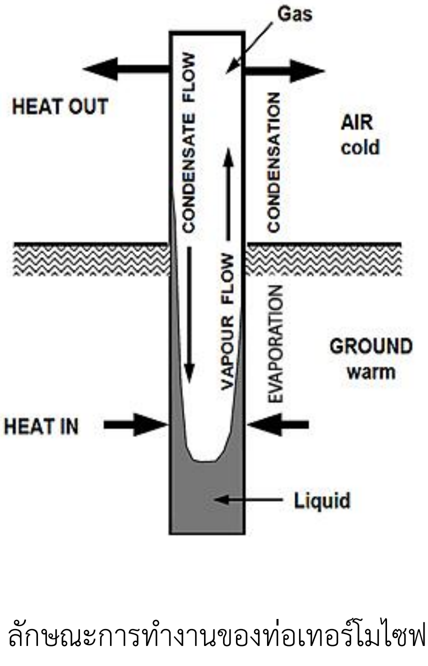
2.4.6 ไมโครเวฟ (Microwave) เตาปฏิกรณ์ประเภทนี้ทำงานโดยการฉายรังสีคลื่นไมโครเวฟ (300 MHz-300 GHz) โดยทั่วไปเตาปฏิกรณ์ประเภทนี้จะใช้ทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากปกติเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่นจะให้ความร้อนโดยผ่านผนังเตาด้วยการนำความร้อน หรือ ผ่านของไหลด้วยการพาความร้อน เป็นการให้ความร้อนบริเวณพื้นผิวชีวมวลจึงแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดีนักหากชีวมวลมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่ดี แต่การให้ความร้อนด้วยการฉายรังสีของเตาแบบไมโครเวฟจะให้ความร้อนโดยตรงไปยังโมเลกุลของชีวมวล ทำให้ร้อนขึ้นในทุก ๆ ส่วนที่ผ่านรังสีพร้อม ๆ กัน [6] จากเอกสารของ Basu P. [6, 21] พบว่า การทอรีแฟคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิภายในชีวมวลสูงมาก

ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุดสำหรับเตาชนิดนี้คือ ระดับของคลื่นไมโครเวฟและระยะเวลากระบวนการ โดยความชื้นไม่ส่งผลเท่ากับตัวแปรข้างต้นนี้ และเตาชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ชีวมวลที่มีขนาดเล็กมาก หากเปรียบเทียบสัดส่วนของ O/C และ H/C ชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการทอรีแฟคชั่นแบบทั่วไป [39]



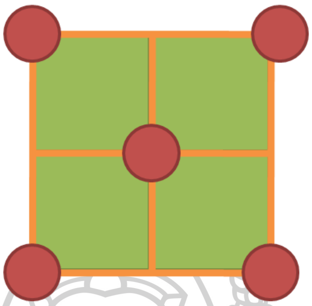
ภาพที่ 21 ผังอุปกรณ์สำหรับการทดลองด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ [39]

2.4.7 เตาเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon reactor) เป็นเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่พัฒนามาจากเตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบด เนื่องจากเตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบดมีข้อเสียคือมักมีการกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะตรงแกนกลาง ดังนั้นจึงใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนรับความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนให้อนุภาคของชีวมวลเพื่อช่วยให้การกระจายความร้อนบริเวณแกนกลางดีขึ้น โดยลักษณะและการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอนแสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ลักษณะการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอน [40]

ท่อเทอร์โมไซฟอนจะรับความร้อนจากด้านล่างของท่อทำให้ของไหลภายในท่อเปลี่ยนสถานะเป็นไอและลอยขึ้นไปแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับด้านบน ซึ่งในที่นี้คือชีวมวล ก่อนจะควบแน่นลงมารับความร้อนที่ด้านล่างของท่ออีกครั้งและวนอยู่ลักษณะนี้เป็นวัฏจักรต่อไป [41] ภายในเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนจะวางท่อและชีวมวลดังภาพที่ 23 เพื่อช่วยให้อุณหภูมิกระจายตัวได้ดีขึ้น



ภาพที่ 23 ตำแหน่งการวางท่อภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเทอร์โมไซฟอน สีแดงคือท่อเทอร์โมไซฟอน สีส้มคือครีบนำความร้อน สีเขียวคือชีวมวล

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นมีหลายประเภทซึ่งมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน จึงต้องทำความเข้าใจลักษณะของเตาแต่ละชนิดเพื่อให้สามารถเลือกใช้เตาได้เหมาะสม นอกจากเตาที่กล่าวมาแล้วก็ยังมีเตาชนิดอื่นที่มีข้อดีข้อเสียที่น่าสนใจดังแสดงในตารางที่ 5 [42]

ตารางที่ 5 แสดงข้อดีข้อเสียของเตาทอรีแฟคชั่นแต่ละชนิด

ชนิดของเตาปฏิกรณ์	ข้อดี	ข้อเสีย
1. มูฟวิ่งเบด (Moving bed reactor)	- ทำได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ - มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง - ชิ้นส่วนของเตาไม่มีการเคลื่อนที่ - สามารถปฏิบัติการได้ด้วยชีวมวลที่มีค่าความหนาแน่นต่ำโดยไม่มีผลเสียมาก	- อนุภาคชีวมวลขนาดเล็กทำให้ความดันตกและเป็นสาเหตุให้เตาปิดตัวเองโดยอัตโนมัติ - ขนาดของชีวมวลขึ้นอยู่กับความดัน -การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะกรณีที่ให้ความร้อนทางอ้อม - ช่องว่างระหว่างชีวมวลทำให้การทอรีแฟคชั่นไม่สม่ำเสมอ

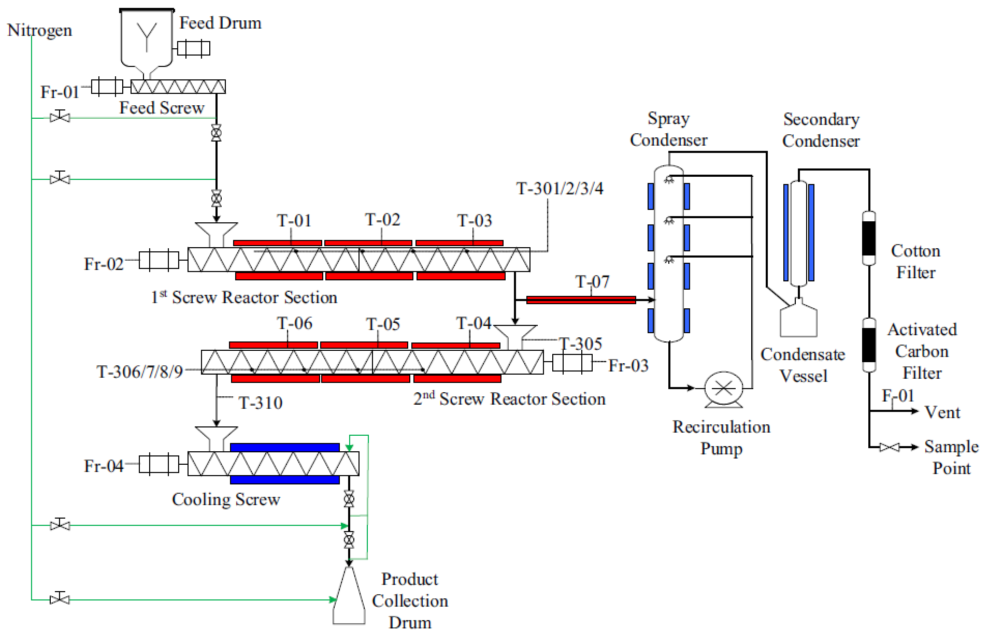
ชนิดของเตาปฏิกรณ์	ข้อดี	ข้อเสีย
		- ควบคุมอุณหภูมิยาก
2. ทอร์เบด (Torbed reactor)	- ระยะเวลากระบวนการต่ำ(น้อยกว่า 100 วินาที) - ได้ผลผลิตในปริมาณสง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนดีและใช้ระยะเวลาน้อย - สามารถเพิ่มหรือลดขนาดการผลิตได้ (มากถึง 25 ตัน/ชั่วโมง) - สามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ได้อย่างแม่นยำ	- ต้องใช้เชื่อเพลิงในปริมาณมาก - ปริมาตรความจุของเตาจำกัด - อุณหภูมิสูงจะทำให้สูญเสียโวลาไทล์ - ปริมาณทาร์สูงเนื่องมาจากการสูญเสียโวลาไทล์
3. เครื่องอบแห้งเบลท์ (Belt dryer)	- ควบคุมอุณหภูมิได้ดีขึ้น - ช่วงของขนาดอนุภาคที่สามารถใช้ได้กว้าง - ใช้ต้นทุนต่ำ - ควบคุมระยะเวลากระบวนการได้ง่ายด้วยการควบคุมความเร็วสายพาน	- หลุมบริเวณสายพานสามารถอุดตันได้จากฝุ่นและทาร์ ทำให้การทอร์รีแฟคชั่นไม่ทั่วถึงและชีวมวลที่ได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน - ความจุขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของสายพาน - การควบคุมอุณหภูมิทำได้จำกัด - ระบบมีส่วนประกอบหลายชิ้นทำให้ค่าซ่อมบำรุงแพง
4. โรตารี่ดรัม (Rotary drum)	- มีหลายวิธีในการควบคุมกระบวนการทอรีแฟคชั่น ทั้งในกรณีที่ให้ความโดยตรง และให้ความร้อนทางอ้อม - การถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอ	- การแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ - ควบคุมอุณหภูมิยาก - ปริมาณฝุ่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างชีวมวลและดรัม - ค่าความจุสูงสุดอยู่ที่ 10-12 ตัน/ชั่วโมง ผลิตได้ 5 ตัน /ชั่วโมง - ราคาสูง
5. มัลติเปิ้ลเฮิร์ท (Multiple hearth furnaceX	- การแลกเปลี่ยนความร้อนดี - ควบคุมอุณหภูมิได้ดี - ช่วงของขนาดอนุภาคที่ใช้ได้กว้าง	- เตามีขนาดใหญ่ - ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำในกรณีที่ใช้แก๊สไอเสีย

ชนิดของเตาปฏิกรณ์	ข้อดี	ข้อเสีย
	- ขนาดที่สามารถทำได้คือเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-8 เมตร	
6. สกรูคอนเวเยอร์ (Screw conveyer)	- เตามีราคาถูก - ชีวมวลเคลื่อนที่ได้ดี - ช่วงของขนาดอนุภาคที่ใช้ได้กว้าง	- ชีวมวลที่สัมผัสกับผนังเตาจะมีอุณหภูมิสูงกว่า ทำให้กระบวนการทอรีแฟคชั่นไม่สม่ำเสมอ - การแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ดีนักเนื่องจากข้อจำกัดในการผสมกันของชีวมวล - การขยายขนาดของเตามีข้อจำกัดเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของสกรูและปริมาตรของชีวมวล
7. ฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed)	- มีการแลกเปลี่ยนความร้อนดี - เป็นเทคโนโลยีที่เพิ่มขนาดได้ง่าย	- เลือกขนาดอนุภาคได้ยาก - การตอบสนองของอุณหภูมิช้า - ต้องแยกของแข็งที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนออกจากชีวมวลหลังผ่านกระบวนการแล้ว
8. ไมโครเวฟ (Microwave)	- ใช้การแผ่รังสี แทนการนำและการพาความร้อน - แลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีและเร็ว - การถ่ายเทความร้อนไม่ขึ้นกับขนาดมากนัก ทำให้ใช้ชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ได้ - ควบคุมอุณหภูมิได้ดี	- ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการ - ต้องใช้การให้ความร้อนแบบอื่นๆช่วยเพื่อให้ได้การทำความร้อนที่เสถียร

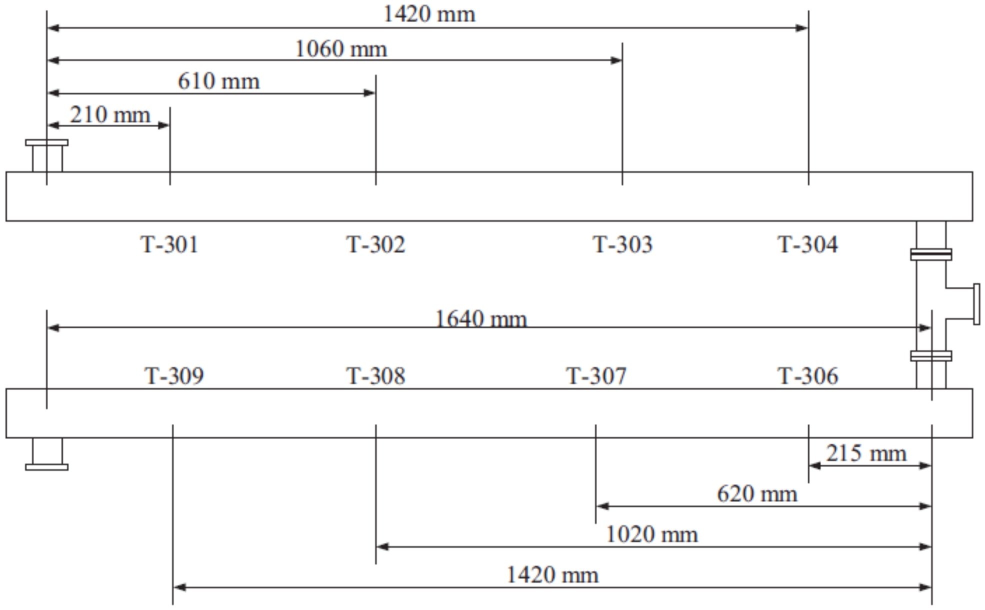
2.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์

จากการสืบค้นข้อมูลงานวิจัยจะพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นประกอบด้วย อุณหภูมิของกระบวนการ ความจุของเตาปฏิกรณ์ และระยะเวลาของ

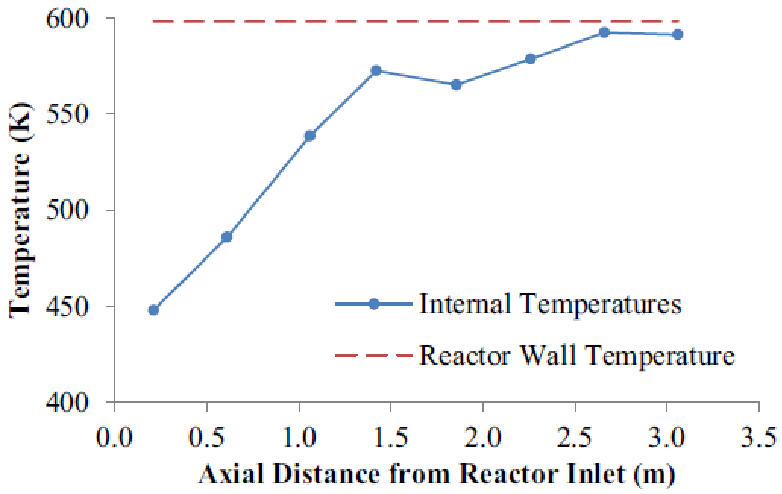
กระบวนการ สิ่งที่สำคัญคือกลไกในการถ่ายเทความร้อนสู่ชีวมวล ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบอย่างมากต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ที่ถูกออกแบบมา เพราะฉะนั้นในการออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นจึงต้องให้ความสำคัญกับปัจจัยดังกล่าวเพื่อให้เตาปฏิกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเหมาะกับชีวมวลที่จะนำมาใช้ร่วมกับเตาปฏิกรณ์ และส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์มีความสม่ำเสมอ เตาปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไม่สม่ำเสมอ จากภาพที่ 24 [43] เป็นผังการทำงานของเตาปฏิกรณ์ชนิดสกรูคอนเวเยอร์ของ Nachenius R. ซึ่งมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลไว้ตามตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 25 เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์



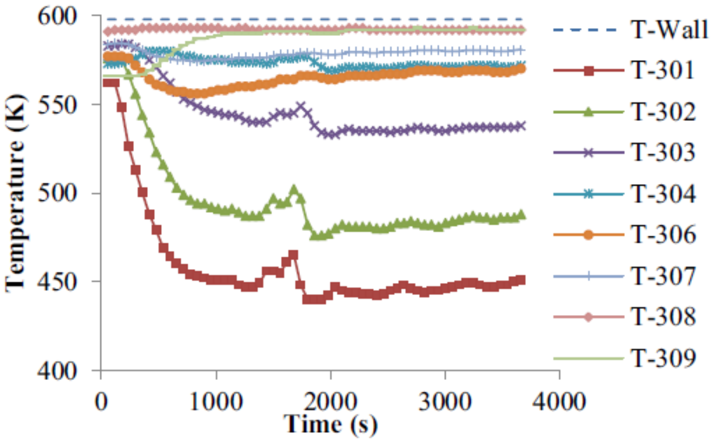
ภาพที่ 24 ผังการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นสกรูคอนเวเยอร์ของ Nachenius R.



ภาพที่ 25 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลของเตาปฏิกรณ์สกรูคอนเวเยอร์ของ Nachenius R. [43]



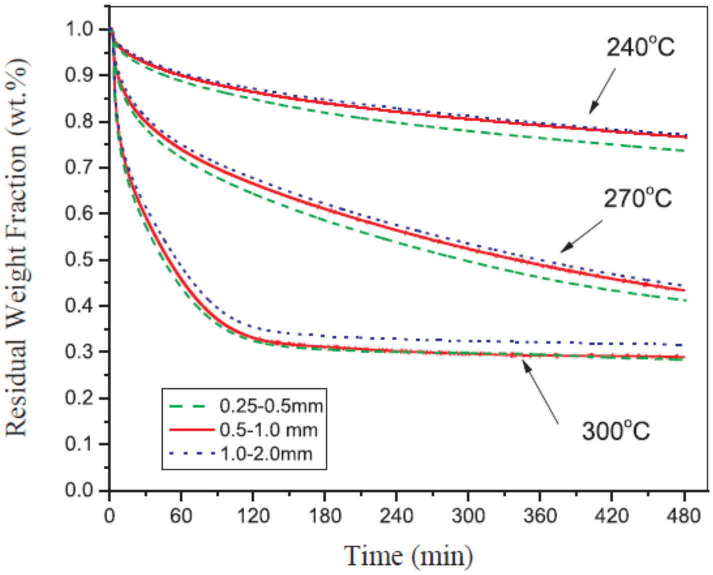
ภาพที่ 26 อุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ภายในเตาปฏิกรณ์สกรูคอนเวเยอร์จากจุดป้อนชีวมวลของ Nachenius R. [43]



ภาพที่ 27 อุณหภูมิตามตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลของเตาปฏิกรณ์สกรูคอนเวเยอร์ของ Nachenius R. [43]

จากภาพที่ 26 และ 27 สังเกตว่าอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ภายในเตาปฏิกรณ์มีค่าไม่เท่ากันยิ่งใกล้จุดป้อนชีวมวลยิ่งมีอุณหภูมิน้อยกว่าเนื่องจากผลกระทบจากอุณหภูมิของอนุภาคชีวมวลมวลที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง [42-44] เมื่อชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ไปสักระยะอุณหภูมิของชีวมวลจะค่อยๆ สูงขึ้นเนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ สังเกตว่าเตาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นดังตัวอย่างของ Nachenius R. การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาจะไม่สม่ำเสมอซึ่งนับเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์

นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคเองก็ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเช่นกัน ขนาดที่เล็กลงเหมือนถึงพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนของอนุภาคชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ [4] [45] จากภาพที่ 28 สังเกตว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะได้รับผลกระทบจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นมากกว่า คือ มีค่าสัดส่วนเชิงมวลลดลงมากกว่าซึ่งในกรณีจากภาพที่ 28 อนุภาคที่เล็กที่สุด คือ 0.25 - 0.5 มิลลิเมตร

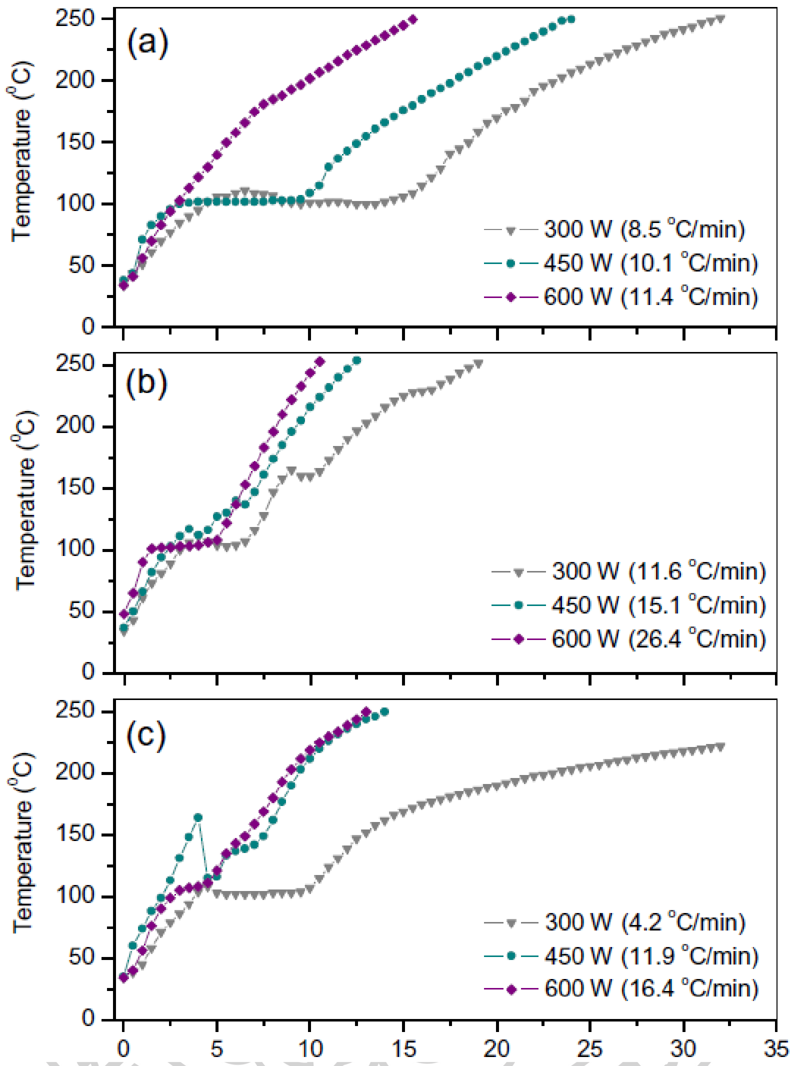


ภาพที่ 28 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงมวลของขี้เลื่อยที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างกัน

ขนาดอนุภาคของชีวมวลจะส่งผลต่อแลกเปลี่ยนความร้อนหรือการรับพลังงานความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนของเตาปฏิกรณ์เพราะฉะนั้นขนาดอนุภาคของชีวมวลจึงส่งผลโดยตรงกับการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 29 [46]จากงานวิจัยของ Natarajan P. พบว่าขนาดอนุภาคจะส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อนและทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิต่างกันออกไป จากภาพที่ 29 พบว่า อนุภาคขนาด 1.4 - 2 มิลิลเมตร มีอัตราการให้ความร้อนสูงสุดที่ค่าพลังงานไมโครเวฟเดียวกันนอกจากจะมีขนาดอนุภาคเล็กแล้วยังมีความชื้นต่ำอีกด้วย ส่วนในกรณีขนาดอนุภาค 0.25 - 0.5 มิลลิเมตร ที่มีอัตราการให้ความร้อนน้อยกว่าที่พลังงานไมโครเวฟเดียวกันเนื่องจากมีปริมาณเถ้าอยู่มาก ดังแสดงในตารางที่ 6 [45] จากกที่กล่าวมาเช่นกันอนุภาคชีวมวลที่มีขนาดเล็กมากจะมีอนุภาคของฝุ่นปนอยู่ซึ่งเท่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะกลายเป็นเถ้าเนื่อจากเป็น อนินทรีย์วัตถุ [47]

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของชีวมวลขี้เลื่อย Prosopis juliflora ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ

ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (wt%)			
	ความชื้น	สารระเหย	ฟิกซ์คาร์บอน	เถ้า
2 - 4	12.0	62.7	24.8	0.5
1.4 - 2	10.8	65.4	22.8	1.0
0.25 - 0.5	12.0	66.6	16.8	4.6



ภาพที่ 29 กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างกระบวนดารทอรีแฟคชั่นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ค่ากำลังไมโครเวฟต่างกัน 300, 450 และ 600 W (a) อนุภาคขนาด 0.25 - 0.5มิลลิเมตร (b) 1.4 - 2.0 มิลิเมตร (c) 2 - 4 มิลิเมตร ค่าอัตราการให้ความร้อนคำนวณในช่วง 100 - 200 องศาเซลเซียส

ดังที่กล่าวมาข้างต้นสังเกตว่าอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์มีความไม่สม่ำเสมอมาจากหลายปัจจัยเช่น ความจุของเตา กลไลในการแลกเปลี่ยนความร้อน ขนาดของอนุภาคชีวมวล เป็นต้น ในงานวิจัยมีการแสดงอุณหภูมิที่กำหนดและอุณหภูมิที่สามารถทำได้จริงเอาไว้ [48] แสดงให้เห็นว่าการที่เตาปฏิกรณ์จะดำเนินกระบวนการได้ตรงตามเงื่อนไขเป็นเรื่องที่ยาก และเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างมาก หากเตาปฏิกรณ์ไม่สามารถดำเนินการได้ตามอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ระยะเวลากระบวนการ หรือ

เงื่อนไขอื่น ๆ ตามที่กำหนดย่อมส่งผลต่อคุณสมบัติเชื้อเพลิงของชีวมวลหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่น

เพราะฉะนั้นการออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นจึงจำเป็นต้องทำให้เหมาะกับชีวมวลที่จะทำการศึกษาและพยายามแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น การออกแบบเตาปฏิกรณ์ที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สม่ำเสมอ มีกลไกการทำงานที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนจึงเป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างมาก และเพื่อให้เตาปฏิกรณ์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงควรต่อยอดด้วยการศึกษาการสร้างแบบจำลองสมดุลพลังงาน เพื่อนำมาทำงานร่วมกับเตาปฏิกรณ์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด [43, 44]

ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง โดยนำท่อความร้อนชนิดกาลักความร้อนมาปรับใช้กับเตาปฏิกรณ์เพื่อให้เตาปฏิกรณ์มีการกระจายตัวของสม่ำเสมอ ใช้ชีวมวลฟางข้าวสับละเอียดขนาด 1 - 2 มิลลิเมตร เป็นตัวอย่างในการทดลอง เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนและลดปริมาณของเถ้าหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่น และนำเชื้อเพลิงชีวมวลหลังเสร็จสิ้นการทอลองไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติเชื้อเพลิง ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าความหนาแน่นบัลค์ ค่าความหนาแน่นพลังงาน ผลผลิตมวล เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่นในสภาวะการทดลองที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังสนใจศึกษาข้อมูลกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ขณะดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่น เพื่อนำข้อมูลมาตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์และนำไปใช้ประกอบการสร้างแบบจำลองสมดุลพลังงานของเตาปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานต่อไป

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การสร้างและทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง” มีรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 แผนการวิจัย

3.2 แผนการทดลอง

3.3 วิธีการทดลอง

3.4 วัตถุดิบและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

3.5 ระยะเวลาการทดลอง

3.6 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

3.1 แผนการวิจัย

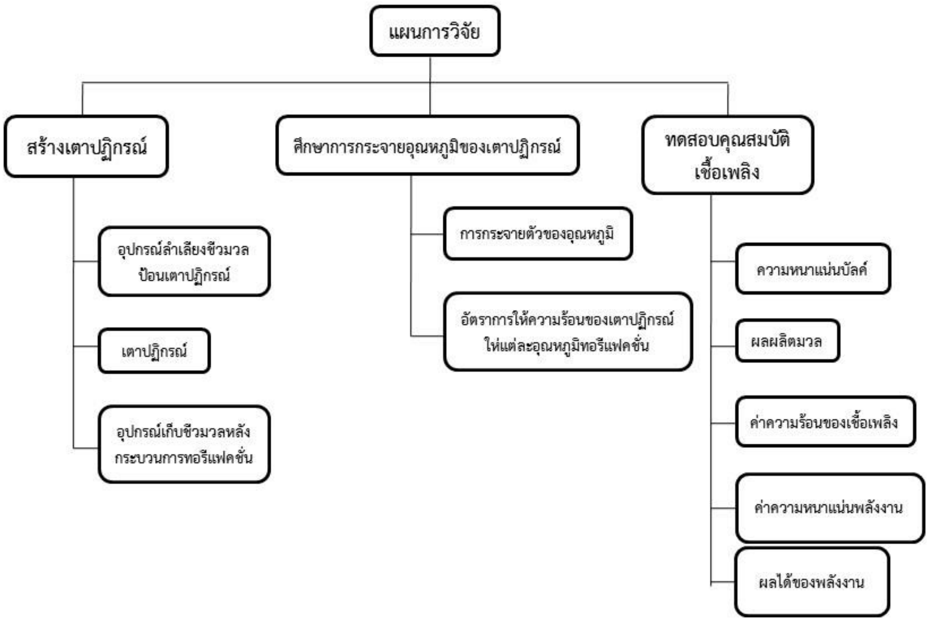
แผนงานวิจัยถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ส่วนที่หนึ่ง คือการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องเพื่อนำไปใช้ในการทดลองการทำงานของเตาปฏิกรณ์ ในการสร้างเตาปฏิกรณ์มีชุดอุปกรณ์สามส่วนด้วยกันคือ อุปกรณ์ลำเลียงชีวมวลเพื่อป้อนเข้าเตาปฏิกรณ์ เตาปฏิกรณ์และอุปกรณ์เก็บชีวมวลหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟคชั่น อุปกรณ์ลำเลียงชีวมวลและอุปกรณ์เก็บชีวมวลทำหน้าที่ในการป้อนและเก็บชีวมวลสำหรับระบบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ให้มีความต่อเนื่องในการดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่น ส่วนที่สองการศึกษาการกระจายของอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ประกอบด้วยการศึกษาอัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นโดยกำหนดอุณหภูมิของห้องให้ความร้อน คือ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส และผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์ทุก 35 นาที ซึ่งส่งผลต่อ รูปแบบการกระจายอุณหภูมิ ความสม่ำเสมอในการกระจายอุณหภูมิ, และนำข้อมูลไปประกอบการศึกษา ส่วนที่สามศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยใช้ชีวมวลขี้เลื่อยขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1 - 5 มิลลิเมตร เป็นตัวอย่างการทดลอง ระยะเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชั่นขึ้นอยู่กับความถี่ในการผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์ ซึ่ง 35 นาทีต่อการผลักชีวมวล 1 ครั้ง การทำงานของเตาปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอุ่นเตาเป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเตาปฏิกรณ์จึงเข้าสู่สภาวะคงที่จุงเริ่มจับเวลาสำหรับผลักชีวมวลออก และทุกครั้งที่ผลักออกจะมีการป้อนชีวมวลเข้าระบบเสมอ จากนั้นนำค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิงหลังการทดสอบไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาการทำงานของเตาปฏิกรณ์เทียบกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่น การวิจัยนี้จะดำเนินการทดลองที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิธีการดำเนินการวิจัยและแผนการทดลองสามารถแสดงได้ดังแผนภูมิในภาพที่ 30

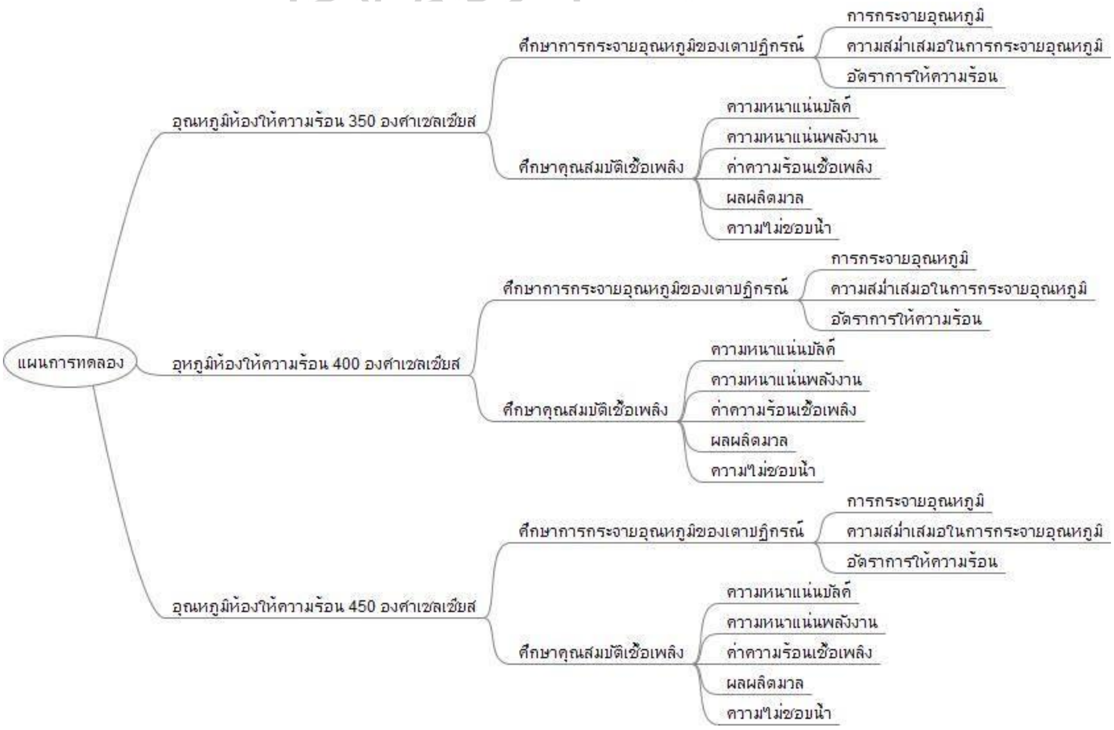
3.2 แผนการทดลอง

แผนการทดลองถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงโดยจะนำเชื้อเพลิงขี้เลื่อยเข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่นตามกรณีศึกษาที่อุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์ คือ 35 นาที ระยะเวลากระบวนการถูกกำหนดด้วยระยะเวลาในการผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์ โดยมีแหล่งความร้อนเป็นเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) คุณสมบัติที่จะทำการทดสอบคือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง การทดสอบดำเนินตามมาตรฐาน ASTMD3286-85 ค่าความหนาแน่นบัลค์ ดำเนินการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM E-873 ค่าความหนาแน่นพลังงานได้จากผลคูณของค่าความหนาแน่นบัลค์และค่าความร้อนเชื้อเพลิง และ ค่าผลผลิตมวลได้จากสัดส่วนระหว่างมวลของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น ค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิงเหล่านี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงจากเตาปฏิกรณ์อื่นที่สภาวะใกล้เคียงกันเพื่อตรวจสอบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง ส่วนที่สองคือการศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ ในแต่ละกรณีศึกษาเพื่อหาอัตราการให้ความร้อนของแต่ละกรณี บันทึกค่าอุณหภูมิแต่ละจุดของเตาปฏิกรณ์เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ และ นำข้อมูลมาตรวจสอบหาการสูญเสียพลังงานของระบบ ศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเปรียบเทียบการทำงาน การถ่ายเทความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่นที่เกี่ยวข้อง แผนการทดลองของงานวิจัยนี้แสดงไว้ดังภาพที่ 31

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 30 แผนการวิจัย



ภาพที่ 31 แผนการทดลอง

3.3 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองสำหรับการสร้างและทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งทดสอบคุณสมบัติของชีวมวล คือ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่นบัลค์ ค่าความหนาแน่นพลังงาน ค่าผลผลิตมวล และความไม่ชอบน้ำ ส่วนที่สองศึกษาการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ทอรแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

วัตถุดิบสำหรับการวิจัยนี้คือ ขี้เลื่อย ชีวมวลถูกเตรียมด้วยเครื่องสับหยาบและเครื่องสับละเอียด จากนั้นผ่านตะแกรงขนาด 5 มิลลิเมตร ชีวมวลถูกอบด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บและพักให้เย็นในโถดูดความชื้นเพื่อเตรียมตัวอย่างไว้สำหรับการทดลองชีวมวลถูกควบคุมความชื้นให้มีค่าอยู่ที่ 10% โดยมวลตามมาตรฐาน ASTM

สภาวะการทดลองด้วยกระบวนการทอรีแฟคชั่นโดยควบคุมอุณหภูมิที่ห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ในแต่ละสภาวะอุณหภูมิจะผลักเชื้อเพลิงออกทุก 35 นาที หลังจากอุ่นเตาแล้วเป็นเวลา 90 นาที เพราะฉะนั้นจึงมีสภาวะการทดลองทั้งหมด 3 กรณีดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สภาวะการทดลอง

สภาวะที่	ชนิดของชีวมวล	อุณหภูมิควบคุม (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการผลักชีวมวล (นาที)
1	ขี้เลื่อย	350	35
2	ขี้เลื่อย	400	35
3	ขี้เลื่อย	450	35

ขั้นตอนในการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องเริ่มจากการอุ่นเตาด้วยการใช้หัวเผาร่วมกับเตาปฏิกรณ์ที่มีท่อกาลักความร้อนเป็นส่วนประกอบอุณหภูมิกำหนดที่ห้องให้ความร้อนคือ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นบริเวณที่อุณหภูมิสามารถควบคุมให้คงที่ได้ง่าย โดยจะอุ่นเตาเป็นเวลา 90 นาที ตามด้วยการป้อนชีวมวลเข้าสู่ฮอปเปอร์ด้านบนของเตา ดังแสดงในภาพที่ 3.5 อุปกรณ์ลำเลียงชีวมวลจะป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์โดยใช้เวลาประมาณ 3 – 5 นาที และเริ่มกระบวนการทอรีแฟคชั่นจนครบระยะเวลาที่

กำหนดแล้วจึงผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์เข้าไปเก็บด้วยอุปกรณ์เก็บชีวมวล เพราะฉะนั้นจากกรณีศึกษาดังที่แสดงในตารางที่ 7 ในงานวิจัยนี้มีวิธีการในการดำเนินการทดลอง ดังนี้

1. เตรียมชีวมวลขี้เลื่อย 8.8 กิโลกรัม โดยประมาณ
2. เตรียมหัวเผาให้ความร้อนกับท่อเทอร์โมไซฟอน และเชื่อต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้ง 27 เส้นที่เชื่อมต่อกับเตาปฏิกรณ์ เข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล
3. เริ่มจุดเตาปฏิกรณ์โดยใช้อุณหภูมิห้องให้ความร้อนเป็นตัวกำหนด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามกรณีศึกษา
4. จับเวลาตั้งแต่เริ่มจุดเตาจนอุณหภูมิห้องให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่กำหนดตามกรณีศึกษา โดยบันทึกค่าอุณหภูมิไว้ทุก 5 นาที
5. นำชีวมวลบรรจุลงในฮอปเปอร์ เพื่อรอการป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์
6. เมื่ออุณหภูมิท่อความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ใช้สกรูฟีดเดอร์ป้อนชีวมวลให้ไหลลงไปภายในเตาปฏิกรณ์จนเต็ม ประมาณ 4.5 กิโลกรัม
7. ควบคุมอุณหภูมิห้องความร้อนให้ตรงกับกรณีศึกษาและควบคุมอุณหภูมิของท่อเทอร์โมไซฟอนให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิของกระบวนการท่อรีแฟคชั่น บันทึกค่าอุณหภูมิของผิวท่อเทอร์โมไซฟอนและชีวมวลที่อยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ ตามตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลโดยติดตั้งบริเวณผิวนอก 16 จุด และภายในท่อ 9 จุด ดังแสดงในภาพที่ 34
8. เมื่อครบ 35 นาที ผลักชีวมวลชุดแรกออกจากเตาปฏิกรณ์ ประมาณ 1 ใน 3 ของชีวมวลที่บรรจุในเตาปฏิกรณ์ พร้อมป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเป็นระยะเวลา 3 - 5 นาที ทำซ้ำกระบวนการนี้ 4 ครั้ง
9. ทำการทดลองจนกระทั่งลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือ ครบกำหนดเวลา 4 ชั่วโมง จึงยุติการทดลอง
10. นำชีวมวลที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชั่นในแต่ละกรณีไปทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ได้แก่ ความหนาแน่นบัลค์ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าความหนาแน่นพลังงาน ผลผลิตเชิงมวล และค่าความไม่ชอบน้ำ ซึ่งวิธีทดสอบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.3.1.1 การหาค่าความร้อน

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงถูกทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ การทดสอบดำเนินตามมาตรฐาน ASTMD3286-85 ตัวอย่างการทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนัก 1 กรัม สำหรับชีวมวลที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น และ 0.5 กรัม สำหรับชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยบรรจุเข้าหัวบอมบ์ พร้อมลวดจุดระเบิดยาว 10 เซนติเมตร โดยให้ลวดจุดระเบิดแตะอยู่บนตัวอย่างจากนั้นจึงดำเนินการทดสอบ ดังนี้

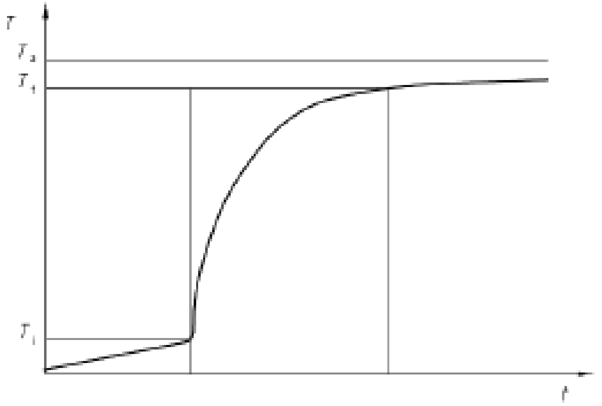
3.3.1.1.1 ปิดฝาหัวบอมบ์ให้เรียบร้อยและนำไปบรรจุก๊าซออกซิเจนให้มีค่าความดัน 200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi)

3.3.1.1.2 เติมน้ำประมาณ 2 ลิตรลงภาชนะสแตนเลสสำหรับบรรจุหัวบอมบ์ และนำเข้าเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ต่อสายไฟเข้าหัวบอมบ์เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการจุดระเบิด ปิดฝาเครื่องซึ่งมีใบกวนสำหรับช่วยการกระจายตัวของอุณหภูมิ

3.3.1.1.3 ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ในถังบรรจุน้ำสำหรับตรวจสอบค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเริ่มเปิดเครื่องให้ใบกวนทำงานเป็นเวลา 5 นาที จึงทำการจุดระเบิดและบันทึกค่าอุณหภูมิทุก ๆ 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3.3.1.1.4 เมื่อทดสอบเสร็จสิ้นนำหัวบอมบ์ออกจากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์เปิดหัวบอมบ์วัดความยาวลวดจุดระเบิดที่เหลือ ชั่งน้ำหนักชีวมวลที่เหลือจากการทดสอบ

3.3.1.1.5 นำข้อมูลอุณหภูมิที่จดบันทึกไว้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลาและอุณหภูมิ จะได้กราฟดังที่แสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบระหว่างเวลาและอุณหภูมิด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

การคำนวณหาค่าความร้อนของชีวมวลด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ สามารถทำได้ด้วยการใช้สมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (3.1)$$

เมื่อ a คือ เวลาของการจุดระเบิด

b คือ เวลาเมื่ออุณหภูมิถึง 60% ของที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด

c คือ เวลาที่เริ่มต้นของคาบ (หลังจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น) ซึ่งอัตราการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลายเป็นคงที่

t คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ถูกต้อง (องศาเซลเซียส)

t คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่อ่านที่เวลาจุดระเบิด

t_c คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่อ่านได้

r_1 คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาที ก่อนจุดระเบิด

r_2 คือ อัตรา (องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระหว่าง 5 นาที หลังจากเวลาที่เริ่มต้นของคาบ **c**

ค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้ สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 3.2

$$H_g = (tw - e_1 - e_2 - e_3)/m \quad (3.2)$$

เมื่อ H_g คือ ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้ (จูลต่อกรัม)

tw คือ ค่าความจุความร้อนของบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)

m คือ มวลของตัวอย่างเป็น (กรัม)

e_1 คือ ค่าแก้ไข สาหรับ ความร้อนในการเกิดของ (HNO3) 23.9 แคลอรี

e_2 คือ ค่าแก้ไข สาหรับ ความร้อนในการเกิดของ (H2SO4) 13.7 แคลอรี

e_3 คือ ค่าแก้ไข สาหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิกเกิลโครม)

ค่ามาตรฐานของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์สามารถหารได้โดยใช้สมการที่ 3.3

$$W = (H_m + e_1 + e_3)/t \quad (3.3)$$

เมื่อ W คือ ค่าความจุความร้อนของบอมบ์คลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่ออองศา เซลเซียส)

H คือ Heat of combustion of Standard benzoic acid (ให้พลังงาน 6318 แคลอรีต่อกรัม)

m คือ มวลของตัวอย่างเป็นกรัม

t คือ ผลรวมของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)

e_1 คือ ค่าแก้ไข สาหรับ ความร้อนในการเกิดของ (HNO3) 23.9 แคลอรี

e_3 คือ ค่าแก้ไข สาหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/ เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิกเกิลโครม)

3.3.1.2 การทดสอบหาความหนาแน่นบัลค์

ความหนาแน่นบัลค์ คือ น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร การทดสอบหาความหนาแน่นบัลค์ดำเนินการโดยใช้มาตรฐาน ASTM E-873 เริ่มด้วยการเทชีวมวลด้วยความสูง 610 mm ลงในกล่องขนาด 305x305x305 mm จากนั้นกระแทกกล่องกับพื้นโดยยกกล่องขึ้นสูง 150 mm ทั้งหมด 25 ครั้ง และเติมชีวมวลจนเต็มจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นบัลค์ ดังสมการที่ 3.4

$$p_{bulk} = (m_f - m_b)/V_b \quad (3.4)$$

เมื่อ p_{bulk} คือ ความหนาแน่นบัลค์ (กรัมต่อลิตร)

m_f คือ มวลของวัตถุที่ต้องการหาค่าความหนาแน่นบัลค์ (กรัม)

m_b คือ มวลของกล่อง (กรัม)

V_b คือ ปริมาตรของกล่อง (ลิตร)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาพที่ 33 เครื่องทดสอบหาค่าความหนาแน่นบัลค์

3.3.1.3 ค่าความหนาแน่นพลังงาน

ค่าความหนาแน่นพลังงาน คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเทียบกับปริมาตรสามารถหาได้จากผลคูณของค่าความร้อนสูงและค่าความหนาแน่นบัลค์ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$\text{Energy Density} = \text{HHV} \times p_{bulk} \tag{3.5}$$

เมื่อ Energy Density คือ ค่าความหนาแน่นพลังงาน (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร)

HHV คือ ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

p_{bulk} คือ ความหนาแน่นบักค์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

3.3.1.4 ค่าผลผลิตมวล

ค่าผลผลิตมวล คือ สัดส่วนระหว่างน้ำหนักของชีวมวลก่อนและหลังเข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่น สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.6

$$\text{mass yield} = m_1/m_0 \tag{3.6}$$

เมื่อ m_0 คือ น้ำหนักของชีวมวลก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

m_1 คือ น้ำหนักของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ข้อมูลคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ได้จากการทอรีแฟคชั่นจากเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ ที่ดำเนินกระบวนในสภาวะใกล้เคียงกัน เพื่อตรวจสอบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบต่อเนื่อง

3.3.1.5 ค่าผลได้ของพลังงาน

ค่าผลได้ของพลังงานคือสัดส่วนระหว่างพลังงานที่คงเหลือในชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นเทียบกับค่าพลังงานเดิมของชีวมวลก่อนผ่านกระบวนการ เนื่องมาจากมีการสูญเสียองค์ประกอบของชีวมวลบางส่วนที่มีพลังงานเบาบางไปในกระบวนการจึงส่งผลให้พลังงานโดยรวมของชีวมวลสูญหายไป วิธีการหาค่าผลได้พลังงานแสดงไว้ดังสมการที่ 3.7 [1]

ค่าผลได้พลังงาน = พลังงานของผลผลิตทอรีไฟร์/พลังงานของชีวมวลดิบ (3.7)

$$= [(HHV_t \times M_t)/ (HHV_r \times M_r)] \times 100\%$$

เมื่อ HHV_t คือ ค่าความร้อนของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

HHV_r คือ ค่าความร้อนของชีวมวลดิบ

M_t คือ มวลของชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

M_r คือ มวลของชีวมวลดิบ

3.3.1.6 ค่าความไม่ชอบน้ำ

ขั้นตอนการทดสอบการดูดซับความชื้นของชีวมวล

1. นำชีวมวลห่อฟอยล์เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำชีวมวลที่ผ่านการอบ 24 ชั่วโมง มาบรรจุลงในโถดูดความชื้นและเปิดปั๊มเพื่อให้โถดูดความชื้นมีสภาวะเป็นสุญญากาศเป็นเวลา 5 นาที
3. นำชีวมวลออกจากโถดูดความชื้นแบ่งตัวอย่างบรรจุลงภาชนะ ภาชนะละ 5 กรัม จำนวน 6 ถาด จากนั้นนำเข้าตู้ดูดความชื้นที่สภาวะ 30 องศาเซลเซียส 90%RH

4. ในชั่วโมงแรกบันทึกค่าน้ำหนักทุก 10 นาที ในชั่วโมงที่ 2 – 5 บันทึกน้ำหนักทุก 30 นาที และจากนั้นจะบันทึกน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมงจนไม่มีการเปลี่ยนแปลง

นำค่าน้ำหนักที่บันทึกมาคำนวณหาค่าความชื้นสมดุล สมการที่ใช้ในการคำนวณความชื้นสมดุลได้แสดงไว้ในสมการที่ 3.8

$$M = ((m - m_i)/m_i) \times 100 \qquad (3.8)$$

เมื่อ M คือ ความชื้นสมดุลของชีวมวล (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

m คือ น้ำหนักชีวมวล ณ เวลานั้น ๆ (กรัม)

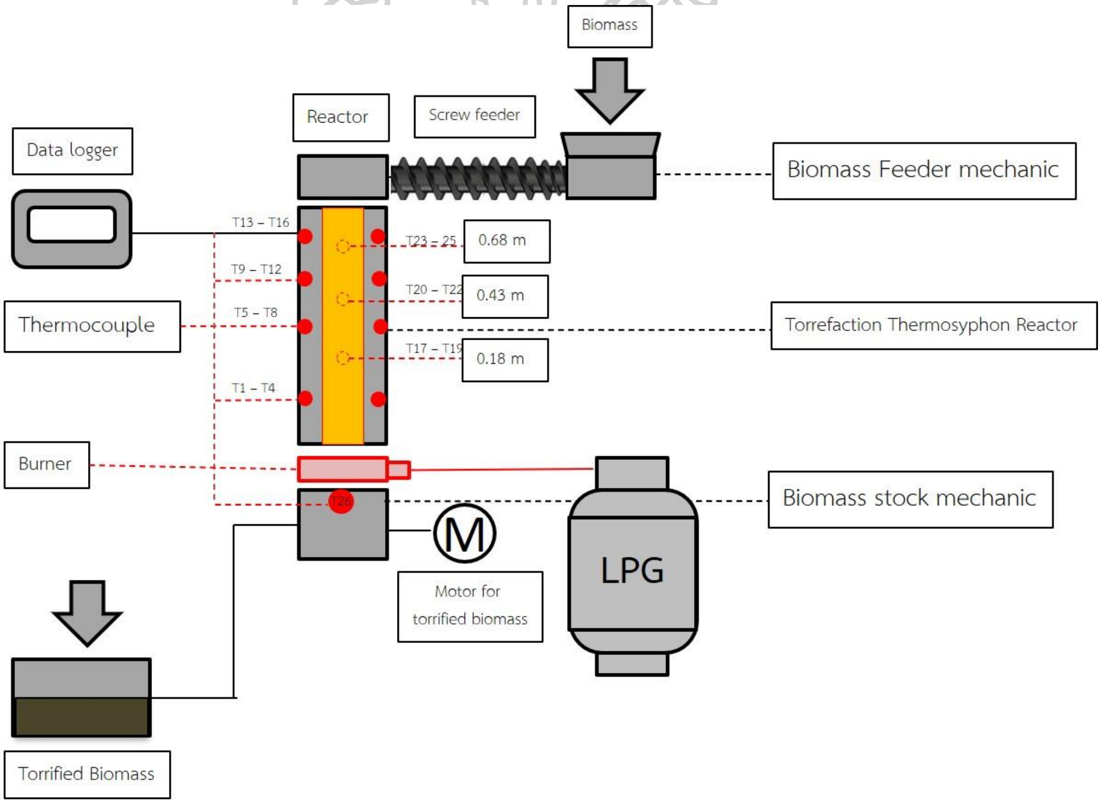
m_i คือ น้ำหนักชีวมวลก่อนเข้ากระบวนการ (กรัม)

3.3.2 การตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์

ภายในเตาปฏิกรณ์จะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลสำหรับวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในเตาปฏิกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 34 เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ศึกษาการลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ และศึกษาอัตราการให้ความร้อนของแต่ละอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่กำหนดด้วยอุณหภูมิของห้องให้ความร้อน คือ 350, 400, และ 450 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ ขั้นตอนในการทดตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์มีดังนี้

1. เตรียมชีวมวลขี้เลื่อย 8.8 กิโลกรัม โดยประมาณ
2. เตรียมหัวเผาให้ความร้อนกับท่อเทอร์โมไซฟอน และเชื่อต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้ง 27 เส้นที่เชื่อมต่อกับเตาปฏิกรณ์ เข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล
3. เริ่มจุดเตาปฏิกรณ์โดยใช้อุณหภูมิห้องให้ความร้อนเป็นตัวกำหนด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามกรณีศึกษา
4. จับเวลาตั้งแต่เริ่มจุดเตาจนอุณหภูมิห้องให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่กำหนดตามกรณีศึกษา โดยบันทึกค่าอุณหภูมิไว้ทุก 5 นาที
5. นำชีวมวลบรรจุลงในฮอปเปอร์ เพื่อรอการป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์
6. เมื่ออุณหภูมิท่อความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ใช้สกรูฟีดเดอร์ป้อนชีวมวลให้ไหลลงไปภายในเตาปฏิกรณ์จนเต็ม ประมาณ 4.5 กิโลกรัม

7. ควบคุมอุณหภูมิห้องความร้อนให้ตรงกับกรณีศึกษาและควบคุมอุณหภูมิของท่อเทอร์โมไซฟอนให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิของกระบวนการท่อรีแฟคชั่น บันทึกค่าอุณหภูมิของผิวท่อเทอร์โมไซฟอนและชีวมวลที่อยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ ตามตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลโดยติดตั้งบริเวณผิวนอก 16 จุด และภายในท่อ 9 จุด ดังแสดงในภาพที่ 34
8. เมื่อครบ 35 นาที ผลักชีวมวลชุดแรกออกจากเตาปฏิกรณ์ ประมาณ 1 ใน 3 ของชีวมวลที่บรรจุในเตาปฏิกรณ์ พร้อมป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเป็นระยะเวลา 3 - 5 นาที ทำซ้ำกระบวนการนี้ 4 ครั้ง
9. ทำการทดลองจนกระทั่งลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือ ครบกำหนดเวลา 4 ชั่วโมง จึงยุติการทดลอง
10. นำข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลมาตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง



ภาพที่ 34 แสดงภาพรวมของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องและตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ

บริเวณผิวภายนอกเตาปฏิกรณ์มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้งหมด 4 ระดับ ในแต่ละระดับติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ล 4 ตำแหน่งโดยรอบ โดยการติดตั้งตามความสูงของเตาปฏิกรณ์เริ่มจากก้นเตาขึ้นไป 12, 20, 24 และ 24 เซนติเมตรสำหรับ T1 – T4, T5 – T8, T9 – T12 และ T13 – T16 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 16 ตำแหน่ง ส่วนภายในเตาปฏิกรณ์มีการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ล 3 ระดับ ในแต่ละระดับมี 3 ตำแหน่ง ติดตั้งตามความสูงของเตาปฏิกรณ์เริ่มจากก้นเตา คือ 18, 25 และ 25 เซนติเมตร สำหรับ T17 – T19, T20 – T22 และ T23 – T25 ตามลำดับ สำหรับ T26 ติดตั้งไว้บริเวณห้องให้ความร้อน และ T27 คืออุณหภูมิบรรยากาศ

3.4 วัตถุดิบและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

3.4.1 วัตถุดิบสำหรับงานวิจัยนี้คือ ขี้เลื่อย ซึ่งได้มาจาก “บริษัท วิเชียรค้าไม้และวัสดุก่อสร้าง จำกัด เลขที่ 87/10 หมู่5 ตำบลศรีษะทอง อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม 73120”

ภาพที่ 35 ชีวมวลขี้เลื่อย

3.4.2 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

3.4.2.1.1 เครื่องสับหยาบ ใช้ลดขนาดของชีวมวลจนมีขนาดเล็กลงอยู่ในช่วง 1 - 5 เซนติเมตร มีลักษณะดังภาพที่ 36

ภาพที่ 36 เครื่องสับหยาบ Gimatic รุ่น MA110

3.4.2.2 เครื่องสับละเอียด ใช้ลดขนาดของชีวมวลจนมีขนาดเล็กลง ตะแกรงที่ใช้คัดขนาดภายในเครื่องสับละเอียดมีขนาด 2 5และ 9 มิลลิเมตร มีลักษณะดังภาพที่ 37

ภาพที่ 37 เครื่องสับละเอียด Gimatic รุ่น MA207

3.4.2.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่อง เป็นเตาปฏิกรณ์ที่ดัดแปลงมาจากเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเดิมดังแสดงในภาพที่ 38 (ก) ให้มีการป้อนชีวมวลแบบต่อเนื่องโดยอาศัยหลักการทำงานของเตามูฟวิ่งเบด (Moving bed reactor) โดยความสูงของท่อความร้อนในส่วนควบแน่นเท่ากับ 0.6 เมตร และความสูงของ ส่วนทำระเหยเท่ากับ 0.3 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 38 (ข)

38 (ก.) 38 (ข.)

ภาพที่ 38 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน 38 (ก.) และ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง 38 (ข.)

3.4.2.4 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) Graphtec midi LOGGER GL820 เป็นเครื่องที่ใช้เก็บบันทึกข้อมูล สามารถกำหนดความถี่ในการบันทึกได้ ในการวิจัยนี้ใช้วัดอุณหภูมิในส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหย เครื่องบันทึกข้อมูลแสดงในภาพที่ 39

ภาพที่ 39 เครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec midi LOGGER GL820

3.4.2.5 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (thermocouple) เป็นอุปกรณ์ใช้ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล สำหรับการเก็บข้อมูลความร้อน ในการวิจัยนี้ใช้สายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K มีช่วงการใช้งานคือ 270 ถึง 1320 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 40

ภาพที่ 40 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด k (thermocouple)

3.4.2.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักชีวมวลทั้งก่อนและหลังเข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่น และใช้ชั่งน้ำหนักถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว เป็นเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบวางพื้น ยี่ห้อ AND รุ่น EM-150KAL พิกัดน้ำหนัก 150 กิโลกรัม ค่าความละเอียด 10 กรัม ดังภาพที่ 41

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาพที่ 41 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบวางพื้น ยี่ห้อ AND รุ่น EM-150KAL

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิใช้เครื่องบันทึกข้อมูล รุ่น GRAPHTEC midi LOGGER GL820 ร่วมกับสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด k ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิทั้งหมด 10 จุดของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน โดยติดตั้งบริเวณทำระเหย 3 จุด (T7-T9) บริเวณควบแน่น 6 จุด (T1-T6) และบริเวณท่อระบายความร้อน 1 จุด (T10) บริเวณส่วนทำระเหยจะติดตั้งเหนือจากขอบล่างสุดของท่อความร้อน 7 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างจุด 27.2 เซนติเมตร รอบเตาปฏิกรณ์ทั้งหมด 3 จุด บริเวณส่วนควบแน่นจะติดสองข้าง ข้างละ 3 จุด ติดตามระดับความสูงห่างกันจุดละ 12 เซนติเมตร จากขอบด้านล่างขึ้นด้านบนเหมือนกันทั้ง 2 ข้าง และส่วนท่อระบายความร้อน จะติดห่างจากหน้าแปลนด้านบนเป็นระยะ 7 เซนติเมตร ดังภาพที่ 34

3.5 ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มการทดลองเก็บข้อมูลสำหรับการวิจัยตั้งแต่เดือนตุลาคม 2560 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2561 และการสรุปผลการทดลองพร้อมเขียนรายงานการวิจัยจะแล้วเสร็จภายในเดือนธันวาคม 2561 ซึ่งการดำเนินการตลอดระยะเวลาการวิจัยสามารถเขียนเป็นตารางสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 8 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงาน	2560											2561					
	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. หาหัวข้องานวิจัย	■																
2. ทดสอบการทอรีไฟร์ของรีแอคเตอร์ต้นแบบ		■															
3. สร้างเตาทอรีแฟคชั่น			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
4. ทดสอบเตาทอรีแฟคชั่น															■	■	■
5. วิเคราะห์ผลการทดสอบ																■	■
6. สรุปผลการทดสอบและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์																	■

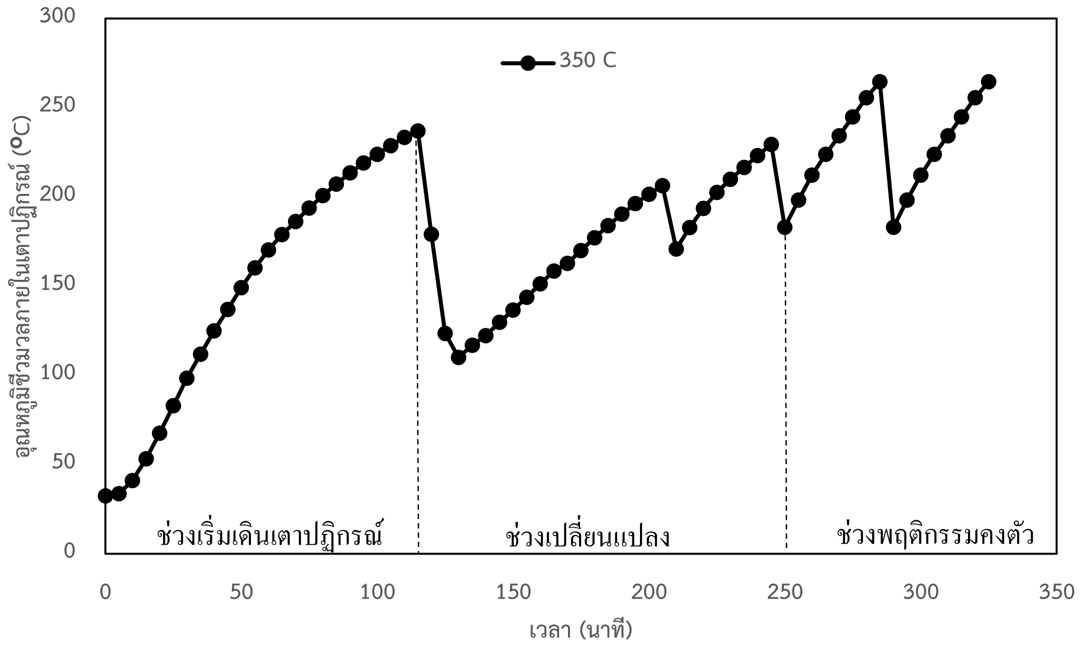
มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 4
ผลการทดลอง

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์และศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเมื่อโดยมีอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นและระยะเวลากระบวนการเป็นตัวแปรต้น โดยคุณสมบัติที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ผลผลิตมวล ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าความหนาแน่นบัลค์ ค่าความหนาแน่นพลังงาน และค่าความไม่ชอบน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ในช่วงเปลี่ยนแปลง

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องมีการทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยเริ่มจากอุ่นเตาปฏิกรณ์เปล่าจนอุณหภูมิถึงกรณีที่กำหนดแล้วบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ใช้เวลาประมาณ 15 นาที การผลักชีวมวลออกจากเตาตามช่วงเวลา 35 นาที/ครั้งและมีการบรรจุชีวมวลลงสู่เตาปฏิกรณ์ใหม่ใช้เวลาประมาณ 5 นาที แล้วจึงผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์เมื่อครบกำหนดเวลา

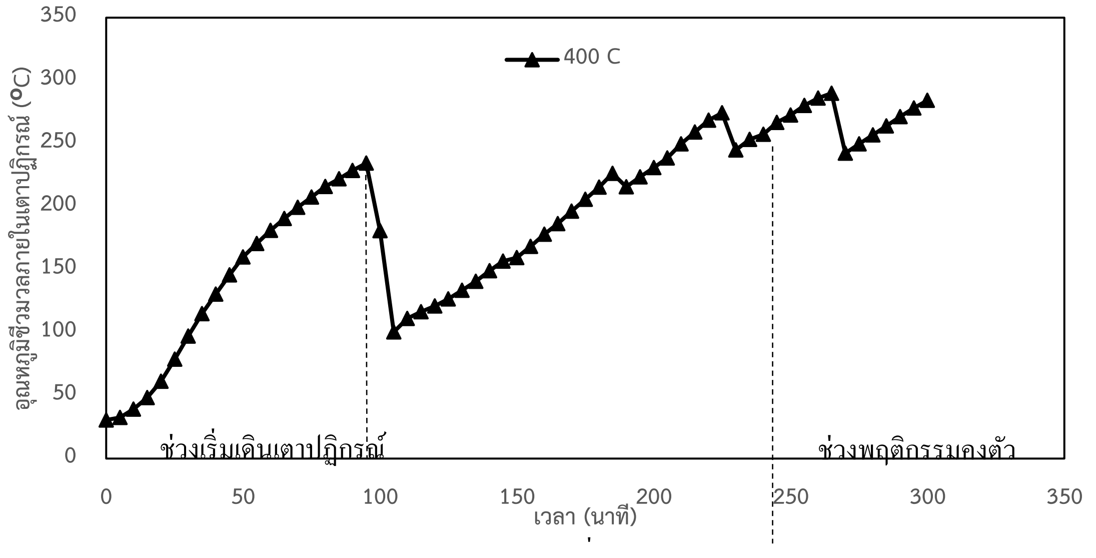


ภาพที่ 42 อุณหภูมิเฉลี่ยของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ กรณี 350 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 42 สังเกตเห็นว่าการทำงานของเตาปฏิกรณ์แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ หนึ่งช่วงเริ่มเดินเตา เป็นช่วงที่เริ่มให้ความร้อนกับเตาปฏิกรณ์เปล่าก่อนมีการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์เมื่อ

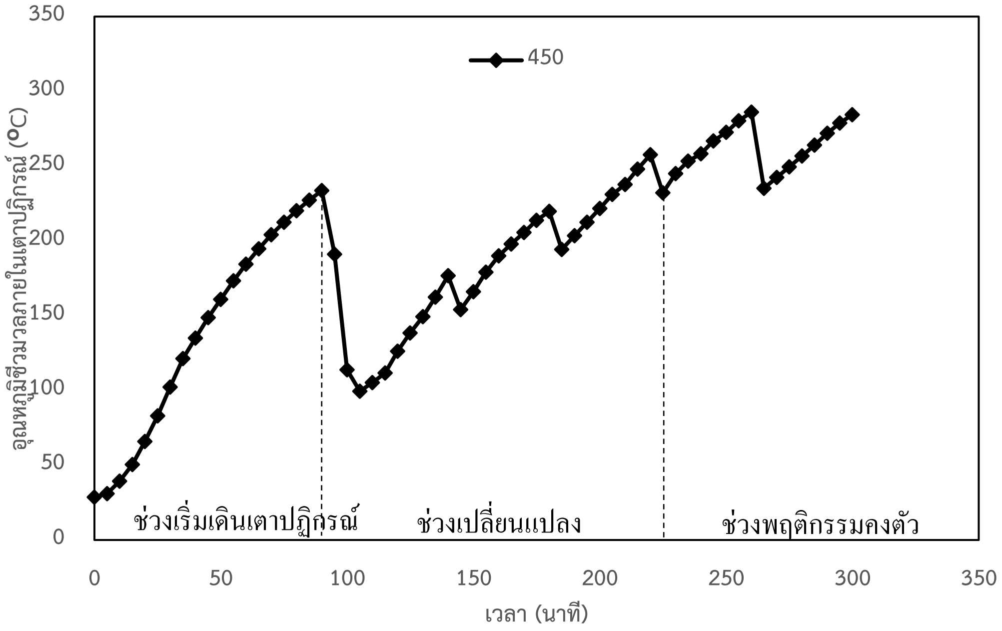
อุณหภูมิห้องให้ความร้อนถึงกรณีศึกษาที่กำหนด สองช่วงเปลี่ยนแปลง และ ช่วงพฤติกรรมคงตัว เป็นช่วงที่เตามีพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในแต่ละครั้งที่ผลักชีวมวลและบรรจุใหม่ใกล้เคียงกันและเกิดซ้ำ ๆ

จากภาพที่ 42 กรณีห้องให้ความร้อน 350 องศาเซลเซียส ช่วงเริ่มเดินเตาใช้เวลา 115 นาที อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นจาก 32.4 องศาเซลเซียส เป็น 206.37 องศาเซลเซียส จากนั้นที่เวลา 115 นาที ได้มีการบรรจุชีวมวลลงสู่เตาปฏิกรณ์เป็นเวลา 15 นาที จนครบเวลา 130 นาที ช่วงเวลา 130 – 245 นาที คือช่วงเปลี่ยนแปลง เตาปฏิกรณ์มีตัวอย่างชีวมวลถูกบรรจุและผลักออกจากเตาปฏิกรณ์ 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชีวมวลดังนี้ ครั้งที่ 1 ที่เวลา 130 – 165 นาที อุณหภูมิ 110.11 – 158.65 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 ที่เวลา 170 – 205 นาที อุณหภูมิ 162.69 – 206.37 องศาเซลเซียส และ ครั้งที่ 3 ที่เวลา 210 – 245 นาที อุณหภูมิ 170.89 – 229.52 องศาเซลเซียส โดยครั้งที่ 1 เข้าสู่ครั้งที่ 2 อุณหภูมิเพิ่มจาก 156.65 องศาเซลเซียส เป็น 170 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 13.35 องศาเซลเซียส จากครั้งที่ 2 -3 อุณหภูมิลดลงจาก 206.37 องศาเซลเซียส เป็น 170.89 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 35.48 จากนั้นเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวเริ่มต้นที่การผลักชีวมวลครั้งที่ 4 ที่เวลา 250 – 285 นาที อุณหภูมิ 183.07 – 264.57 องศาเซลเซียส และ ครั้งที่ 5 ที่เวลา 290 – 325 นาที อุณหภูมิ 183.07 – 264.57 องศาเซลเซียส จากครั้งที่ 3 เข้าสู่ครั้งที่ 4 อุณหภูมิลดลงจาก 229.52 องศาเซลเซียส เป็น 183.07 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 46.45 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 4 เข้าสู่ครั้งที่ 5 ลดลงจาก 264.57 องศาเซลเซียส เป็น 183.07 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 81.5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 43 อุณหภูมิเฉลี่ยของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ กรณี 400 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 43 กรณีห้องให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส ช่วงเริ่มเดินเตาใช้เวลา 95 นาที อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นจาก 30.64 องศาเซลเซียส เป็น 234.57 องศาเซลเซียส จากนั้นที่เวลา 95 นาที ได้มีการบรรจุชีวมวลลงสู่เตาปฏิกรณ์เป็นเวลา 15 นาที จนครบเวลา 110 นาที ช่วงเวลา 110 – 225 นาที คือช่วงเปลี่ยนแปลง เตาปฏิกรณ์มีตัวอย่างชีวมวลถูกบรรจุและผลักออกจากเตาปฏิกรณ์ 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชีวมวลดังนี้ ครั้งที่ 1 ที่เวลา 110 – 145 นาที อุณหภูมิ 111.12 – 156.71 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 ที่เวลา 150 – 185 นาที อุณหภูมิ 159.46 – 226.38 องศาเซลเซียส และ ครั้งที่ 3 ที่เวลา 190 – 225 นาที อุณหภูมิ 215.64 – 274.54 องศาเซลเซียส โดยครั้งที่ 1 เข้าสู่ครั้งที่ 2 อุณหภูมิเพิ่มจาก 156.71 องศาเซลเซียส เป็น 159.46 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 2.75 องศาเซลเซียส จากครั้งที่ 2 -3 อุณหภูมิลดลงจาก 226.38 องศาเซลเซียส เป็น 215.64 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 10.74 องศาเซลเซียส จากนั้นเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวเริ่มต้นที่การผลักชีวมวลครั้งที่ 4 ที่เวลา 230 – 265 นาที อุณหภูมิ 245 – 290.4 องศาเซลเซียส และ ครั้งที่ 5 ที่เวลา 270 – 305 นาที อุณหภูมิ 242.5 – 291.07 องศาเซลเซียส จากครั้งที่ 3 เข้าสู่ครั้งที่ 4 อุณหภูมิลดลงจาก 274.54 องศาเซลเซียส เป็น 245 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 29.54 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 4 เข้าสู่ครั้งที่ 5 ลดลงจาก 290.4 องศาเซลเซียส เป็น 242.5 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 47.9 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 44 อุณหภูมิเฉลี่ยของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ กรณี 450 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 44 กรณีห้องให้ความร้อน 450 องศาเซลเซียส ช่วงเริ่มเดินเตาใช้เวลา 90 นาที อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นจาก 28.62 องศาเซลเซียส เป็น 233.57 องศาเซลเซียส จากนั้นที่เวลา 90 นาที ได้มีการบรรจุชีวมวลลงสู่เตาปฏิกรณ์เป็นเวลา 15 นาที จนครบเวลา 105 นาที ช่วงเวลา 105 – 260 นาที คือช่วงเปลี่ยนแปลง เตาปฏิกรณ์มีตัวอย่างชีวมวลถูกบรรจุและผลักออกจากเตาปฏิกรณ์ 4 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชีวมวลดังนี้ ครั้งที่ 1 ที่เวลา 105 – 140 นาที อุณหภูมิ 99.56 – 176.8 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2 ที่เวลา 145 – 180 นาที อุณหภูมิ 153.97 – 219.64 องศาเซลเซียส และ ครั้งที่ 3 ที่เวลา 185 – 220 นาที อุณหภูมิ 194.21 – 257.67 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 4 ที่เวลา 225 – 260 นาที อุณหภูมิ 232.21 – 286.11 องศาเซลเซียส โดยครั้งที่ 1 เข้าสู่ครั้งที่ 2 อุณหภูมิลดลงจาก 176.8 องศาเซลเซียส เป็น 153.97 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 22.83 องศาเซลเซียส จากครั้งที่ 2 -3 อุณหภูมิลดลงจาก 219.64 องศาเซลเซียส เป็น 194.21 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 25.43 องศาเซลเซียส จากครั้งที่ 3 -4 อุณหภูมิลดลงจาก 257.67 องศาเซลเซียส เป็น 232.21 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 25.46 องศาเซลเซียสจากนั้นเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวเริ่มต้นที่การผลักชีวมวลครั้งที่ 5 ที่เวลา 265 – 300 นาที อุณหภูมิ 235.06 – 284.29 องศาเซลเซียส และครั้งที่ 6 ที่เวลา 305 – 340 นาที อุณหภูมิ 234.54 – 284.08 องศาเซลเซียส จากครั้งที่ 4 เข้าสู่ครั้งที่ 5 อุณหภูมิลดลงจาก 286.11 องศาเซลเซียส เป็น 235.06 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 48.95 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 5 เข้าสู่ครั้งที่ 6 ลดลงจาก 284.29 องศาเซลเซียส เป็น 234.54 องศาเซลเซียส ผลต่างคือ 49.75 องศาเซลเซียส

เมื่ออุณหภูมิห้องควบคุมความร้อนสูงขึ้นระยะเวลาในช่วงเริ่มเดินเตาจะลดลง เนื่องจากมีอัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้น คือ 1.78, 2.15 และ 2.27 องศาเซลเซียส/นาที สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 ตามลำดับ เมื่อเข้าสู่ช่วงเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จะลดลงเนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเตาปฏิกรณ์และชีวมวลทำให้อุณหภูมิลดลง 96.23, 123.45 และ 134.01 องศาเซลเซียส สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส การป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แต่ละครั้งจะมีผลให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ลดลง การบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ครั้งแรกเป็นการบรรจุจนเต็มเตาปฏิกรณ์ซึ่งใช้เวลาประมาณ 15 นาที การผลักชีวมวลออกจากเตาปฏิกรณ์จะผลักออกครั้งละหนึ่งในสามโดยปริมาตรของเตาปฏิกรณ์ การบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์หลังจากนั้นจึงใช้เวลา 5 นาที เพราะฉะนั้นการลดลงของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์หลังจากการบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ครั้งที่ 2, 3 ,4 และ 5 จึงน้อยกว่าครั้งที่ 1

อุณหภูมิหลังจากบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะค่อย ๆ สูงขึ้น จนมีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวดังแสดงในภาพที่ 42 – 44 กรณี 350 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ (110.11, 162.69,170.89,183.07 และ 183.07 กรณี 400 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ 100.37, 159.46, 215.64, 245 และ 242.5 องศาเซลเซียส กรณี 450 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ 99.56, 153.97, 194.21, 232.21 และ 235.06 องศาเซลเซียส หลังจากการป้อนชีวมวลครั้งที่ 1, 2 ,3 ,4 และ 5 ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจากหลังจากการป้อนชีวมวลชีวมวลครั้งที่ 1 ชีวมวลที่อยู่ในเตาได้รับความร้อนจากท่อความร้อนและถูกผลักออกไปเพียงหนึ่งในสาม จึงทำให้ชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ที่เหลือมีเวลาในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ซึ่งการบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ในครั้งที่ 2 เป็นการป้อนชีวมวลเพียงหนึ่งในสามโดยปริมาตรของเตาปฏิกรณ์การสูญเสียความร้อนจากการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงน้อยลง เป็นผลให้อุณหภูมิที่ลดลงหลังจากป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์สูงขึ้น

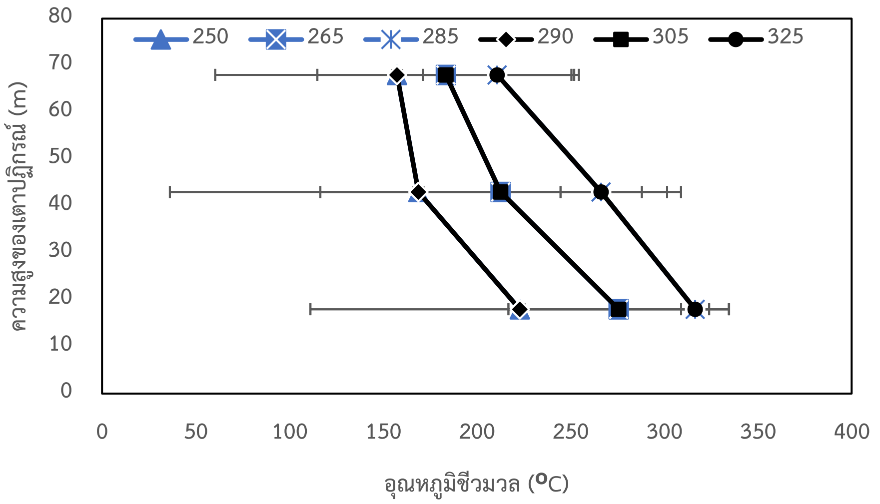
จากภาพที่ 42 -44 พบว่าการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องในช่วงอุ่นเตาปฏิกรณ์และช่วงเปลี่ยนแปลงยังเป็นช่วงที่ไม่พร้อมใช้งานเตาปฏิกรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ จากการป้อนชีวมวลครั้งที่ 1, 2 และ 3 ยังมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการป้อนชีวมวล กรณี 350 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ 110.11, 162.69,170.89,183.07 และ 183.07 กรณี 400 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ 100.37, 159.46, 215.64, 245 และ 242.5 องศาเซลเซียส กรณี 450 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ 99.56, 153.97, 194.21, 232.21 และ 235.06 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเริ่มมีค่าคงตัวหลังจากการป้อนชีวมวลครั้งที่ 4 และ 5 เพราะฉะนั้นจากภาพที่ 42 – 44 พบว่าระยะเวลาที่เตาปฏิกรณ์พร้อมใช้งานเมื่อสังเกตจากกราฟแสดงอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาคือ 285, 265 และ 260 นาที สำหรับกรณีอุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นระยะเวลาหลังจากเริ่มอุ่นเตาปฏิกรณ์และมีการป้อนชีวมวลแล้ว 3 ชุด

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนจะเริ่มเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวหลังจากผ่านช่วงอุ่นเตาและช่วงเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นระยะเวลา 285, 265 และ 260 นาที เตาปฏิกรณ์จึงมีพฤติกรรมคงตัวซึ่งเมื่อเทียบกับเตาปฏิกรณ์ชนิด SRSB ซึ่งทำงานในลักษณะกึ่งต่อเนื่องเช่นกัน จะเข้าสู่ช่วงที่มีพฤติกรรมคงตัวจะใช้เวลาประมาณ 80 นาที โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ย 274 องศาเซลเซียส ใช้เวลาน้อยกว่าเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน เนื่องมาจากเตาปฏิกรณ์ SRSB มีขนาดที่เล็กกว่า จึงเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวได้เร็วกว่าเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน [49]

จากภาพที่ 42 -44 สังเกตเห็นว่าเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนมีการทำงานแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงอุ่นเตา ช่วงเปลี่ยนแปลง และ ช่วงพฤติกรรมคงตัว โดยในแต่ละกร ณีจะใช้เวลาก่อนเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวคือ 285, 265 และ 260 นาที เตาจึงสามารถใช้งานได้ เมื่อเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวอุณหภูมิก่อนและหลังการป้อนชีวมวลจะเริ่มคงตัว คือ 250 – 285 ,270 – 300 และ 265 – 300 องศาเซลเซียส

4.2 การกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ในช่วงพฤติกรรมคงตัว

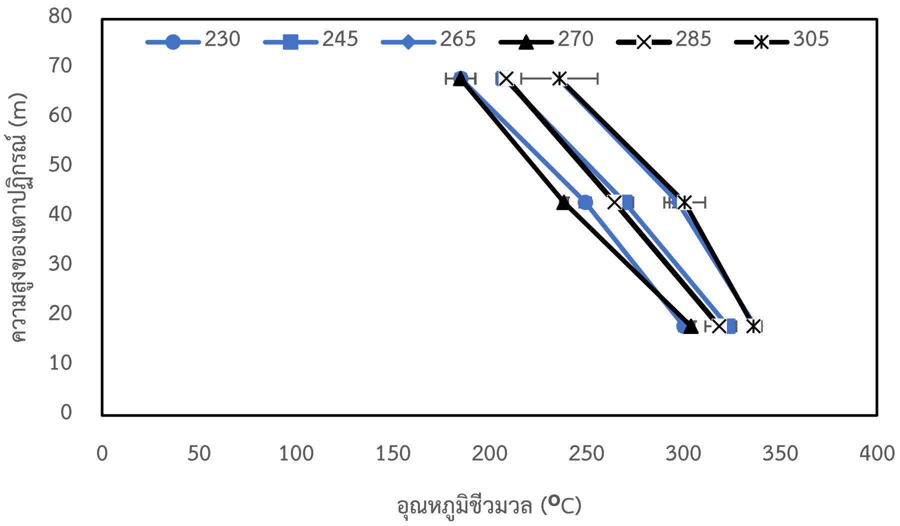
เมื่ออุณหภูมิที่ห้องให้ความร้อนสูงขึ้นจะมีผลให้อัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์สูงขึ้น คือ 1.78, 2.15 และ 2.27 องศาเซลเซียส/นาที สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งทำให้ช่วงเริ่มเดินเตาของเตาปฏิกรณ์ใช้เวลาน้อยลง คือ 115, 95 และ 90 นาที สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ ก่อนเข้าสู่ช่วงการเปลี่ยนแปลง และเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัว การบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะมีผลให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ลดลง โดยจะลดลงมากที่สุดที่การบรรจุชีวมวลครั้งที่ 1 คือ 96.23, 123.45 และ 134.01 องศาเซลเซียส สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างชีวมวลที่ถูกบรรจุเข้ามาภายในเตาปฏิกรณ์และผนังท่อความร้อน โดยอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ที่จะลดลงหลังจากที่มีการบรรจุชีวมวลใหม่เข้าเตาปฏิกรณ์แล้วจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกครั้งที่มีการบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาจนกระทั่งเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัว



ภาพที่ 45 อุณหภูมิชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นช่วงพฤติกรรมคงตัว ที่กรณีห้องให้ความร้อน 350 องศาเซลเซียส บรรจุชีวมวลครั้งที่ 4 และ 5

จากภาพที่ 45 กรณีห้องให้ความร้อนถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 350 องศาเซลเซียส การทำงานของเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวที่การป้อนชีวมวลครั้งที่ 4 เวลา 250 นาที อุณหภูมิชีวมวล 222.9 ± 111.71, 168.87 ± 132.67 และ 157.43 ± 97.04 องศาเซลเซียส ความสูงของเตาปฏิกรณ์ 0.18, 0.43 และ 0.68 เมตร ตามลำดับ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 65.47 องศาเซลเซียส คิดเป็น 29.37% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุด เมื่อชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์จนครบระยะเวลาที่กำหนด อุณหภูมิชีวมวลค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ที่เวลา 265 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 275.67 ± 58.81, 212.73 ± 96.23 และ 183.43 ± 68.53 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 92.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 33.46% ที่เวลา 285 นาที อุณหภูมิชีวมวล 316.5 ± 7.48, 266.37 ± 21.69 และ 210.83 ± 39.66 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 105.67 องศาเซลเซียส คิดเป็น 33.39% มีอัตราการให้ความร้อน 2.33 องศาเซลเซียส/นาที ในช่วงพฤติกรรมคงตัว การป้อนชีวมวลถัดไปในครั้งที่ 5 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จะใกล้เคียงกับการป้อนชีวมวลครั้งที่ 4 คือ ที่เวลา 290 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 222.9 ± 111.71, 168.87 ± 132.67 และ 157.43 ± 97.04 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 65.47 องศาเซลเซียส คิดเป็น 29.37% เมื่อชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์จนครบระยะเวลาที่กำหนด อุณหภูมิชีวมวลค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ที่เวลา 305 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 275.67 ± 58.81, 212.73 ± 96.23 และ 183.43 ± 68.53 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 92.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 33.46% ที่เวลา 325 นาที อุณหภูมิชีวมวล 316.5 ± 7.48, 266.37 ± 21.69 และ 210.83 ± 39.66 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 105.67 องศาเซลเซียส คิดเป็น33.39% มีอัตราการให้ความร้อน 2.33 องศาเซลเซียส/นาที

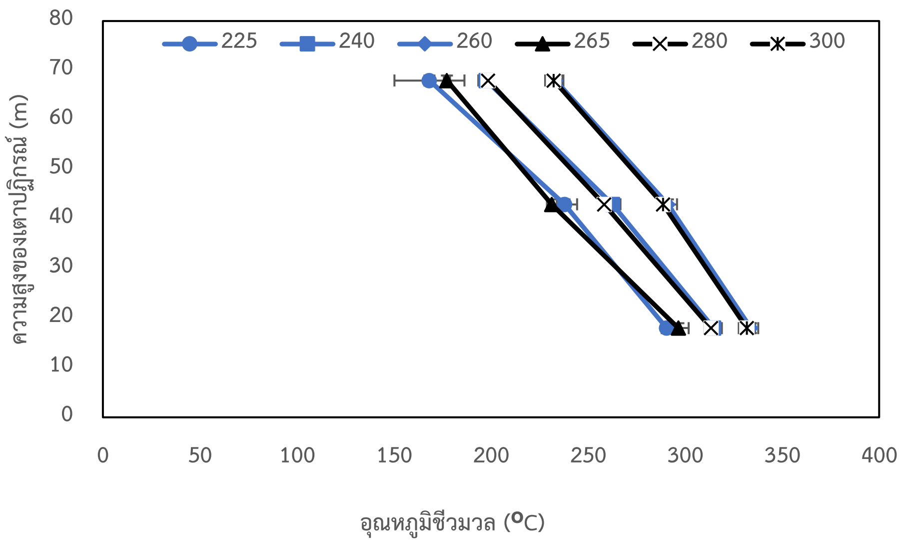
มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 46 อุณหภูมิชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นช่วงพฤติกรรมคงตัว ที่กรณีห้องให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส บรรจุชีวมวลครั้งที่ 4 และ 5

จากภาพที่ 46 กรณีห้องให้ความร้อนถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส การทำงานของเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวที่การป้อนชีวมวลครั้งที่ 4 เวลา 230 นาที อุณหภูมิชีวมวล 300.4 ± 1.29, 277.23 ± 2.96 และ 235.63 ± 7.67 องศาเซลเซียส ความสูงของเตาปฏิกรณ์ 0.18, 0.43 และ 0.68 เมตร ตามลำดับ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 115.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 38.35% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุด เมื่อชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์จนครบระยะเวลาที่กำหนด อุณหภูมิชีวมวลค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ที่เวลา 245 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 323.07 ± 4.38, 269.77 ± 4.45 และ 207.6 ± 4.07 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 115.47 องศาเซลเซียส คิดเป็น 35.74% ที่เวลา 265 นาที อุณหภูมิชีวมวล 337.23 ± 3.31, 297.33 ± 4.38 และ 235.57 ± 2.633 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 101.67 องศาเซลเซียส คิดเป็น 30.15% อัตราการให้ความร้อน คือ 1.297 องศาเซลเซียส/นาที ในช่วงพฤติกรรมคงตัวการป้อนชีวมวลถัดไปในครั้งที่ 5 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จะใกล้เคียงกับการป้อนชีวมวลครั้งที่ 4 คือ ที่เวลา 270 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 304.33 ± 1.83, 238.43 ± 2.14 และ 185.03 ± 7.54 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 119 องศาเซลเซียส คิดเป็น 39.14% เมื่อชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์จนครบระยะเวลาที่กำหนด อุณหภูมิชีวมวลค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ที่เวลา 285 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 318.63 ± 7.19, 264.57 ± 1.76 และ 208.73 ± 3.09 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ

109.9 องศาเซลเซียส คิดเป็น 34.49% ที่เวลา 305 นาที อุณหภูมิชีวมวล 336.5 ± 1.94, 300.8 ± 10.57 และ 236.1 ± 19.72 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 100.2 องศาเซลเซียส คิดเป็น 35.5% มีอัตราการให้ความร้อน 1.195 องศาเซลเซียส/นาที



ภาพที่ 47 อุณหภูมิชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นพฤติกรรมคงตัว ที่กรณีห้องให้ความร้อน 450 องศาเซลเซียส บรรจุชีวมวลครั้งที่ 4 และ 5

จากภาพที่ 47 กรณีห้องให้ความร้อนถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 450 องศาเซลเซียส การทำงานของเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวที่การป้อนชีวมวลครั้งที่ 4 เวลา 225 นาที อุณหภูมิชีวมวล 290.5 ± 1.32, 237.87 ± 6.48 และ 168.27 ± 18.04 องศาเซลเซียส ความสูงของเตาปฏิกรณ์ 0.18, 0.43 และ 0.68 เมตร ตามลำดับ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 122.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 42.08% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุด เมื่อชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์จนครบระยะเวลาที่กำหนด อุณหภูมิชีวมวลค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ที่เวลา 240 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 314.8 ± 4.15, 262.7 ± 3.99 และ 197.57 ± 4.12 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 117.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 37.24% ที่เวลา 260 นาที อุณหภูมิชีวมวล 333.93 ± 3.76, 291.13 ± 4.70 และ 233.27 ± 4.02 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 100.67 องศาเซลเซียส คิดเป็น 30.15% มีอัตราการให้ความร้อน 1.54 องศาเซลเซียส/นาที ในช่วงพฤติกรรมคงตัวการป้อนชีวมวลถัดไปในครั้งที่ 5 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จะใกล้เคียงกับการป้อนชีวมวลครั้งที่ 4 คือ ที่เวลา 265 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 296.53 ±

5.33, 231.37 ± 2.55 และ 177.27 ± 1.597 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 119.27 คิดเป็น 40.22% เมื่อชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์จนครบระยะเวลาที่กำหนด อุณหภูมิชีวมวลค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ที่เวลา 280 นาที อุณหภูมิชีวมวล คือ 313.37 ± 3.48, 258.43 ± 1.46 และ 198.53 ± 1.87 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 114.83 องศาเซลเซียส คิดเป็น 36.65% ที่เวลา 300 นาที อุณหภูมิชีวมวล 331.87 ± 4.23, 288.63 ± 2.94 และ 232.37 ± 4.48 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ 99.5 องศาเซลเซียส คิดเป็น 29.98% มีอัตราการให้ความร้อน 1.41 องศาเซลเซียส/นาที

ชีวมวลมีคุณลักษณะในการต้านทานการนำความร้อน ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์จึงมีอุณหภูมิมากที่สุดที่ก้นเตาซึ่งอยู่ใกล้ห้องให้ความร้อนมากที่สุดและอุณหภูมิค่อย ๆ น้อยลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ดังสังเกตได้จากภาพที่ 45 – 47 โดยเนื่องจากมีการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ทางด้านบนเตาจึงทำให้ที่ระดับความสูง 0.68 เมตร จากก้นเตาปฏิกรณ์เป็นจุดที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดของโดยค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิของชีวมวลที่ระดับความสูง 0.68 เมตร กับ 0.18 เมตร จะมีค่า 105.67, 100.2 และ 99.5 องศาเซลเซียส ที่ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ครั้งที่ 5 ซึ่งมากกว่าผลต่างของอุณหภูมิชีวมวลที่ระดับความสูง 0.43 เมตร กับ 0.18 เมตร ซึ่งมีค่า 50.13, 35.3 และ 43.23 องศาเซลเซียส ที่ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ชีวมวลจะถูกผลักออกจากเตาปฏิกรณ์ 35 นาที/ครั้ง โดยผลักออกไปหนึ่งในสามโดยปริมาตร และป้อนกลับเข้าสู่เตาด้านบนหนึ่งในสามของเตาเช่นกัน ดังนั้นอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ที่ก้นเตาปฏิกรณ์จึงมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือที่ความสูง 0.43 เมตร และน้อยสุดคือ 0.18 เมตร ตามระยะเวลาที่ชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างชีวมวลและผนังเตาปฏิกรณ์

เมื่อเปรียบเทียบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องกับชนิดฟิกซ์เบดแล้ว พบว่าค่าผลต่างของอุณหภูมิสูงที่สุดและอุณหภูมิต่ำที่สุดในช่วงพฤติกรรมคงตัวของเตาปฏิกรณ์ชนิดต่อเนื่องมีค่ามากกว่าเตาปฏิกรณ์ชนิดฟิกซ์เบด เมื่อเทียบที่กรณีควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 450 องศาเซลเซียส คือ 100 และ 40 องศาเซลเซียส (Soponpongpipat et al, 2020) [50] แสดงให้เห็นว่าเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดฟิกซ์เบดมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอกว่าเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง การป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ให้มีลักษณะการทำงานแบบกึ่งต่อเนื่องทำให้เตาปฏิกรณ์มีการสูญเสียความร้อนให้กับชีวมวลใหม่ที่เข้าสู่เตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดฟิกซ์เบดซึ่งเป็นระบบปิด ชีวมวลจะค่อย ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้น

ตลอดการเคลื่อนที่จากด้านบนสู่ด้านล่างจนเมื่อชีวมวลครบกำหนดเวลาและถูกผลักออกจากเตาปฏิกรณ์ชีวมวลจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังเตาปฏิกรณ์

ลักษณะเดียวกันนี้เกิดขึ้นเช่นกันกับเตาปฏิกรณ์ป้อนชีวมวลต่อเนื่องชนิดอื่น เช่น เตาปฏิกรณ์ชนิดสกรูคอนเวเยอ์ของ Nachenius et al ซึ่งมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและอุณหภูมิต่ำที่สุด คือ บริเวณที่อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น คือ 200 องศาเซลเซียส และ บริเวณทางออก ประมาณ 125 องศาเซลเซียส (Nachenius et al, 2015) [43] ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับความยาวของเตาปฏิกรณ์คือ 56 องศาเซลเซียส/เมตร ซึ่งสำหรับกรณีเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โฒไซฟอน คือ 100 องศาเซลเซียส และ 147 องศาเซลเซียส/เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องมีความคล้ายกับเตาปฏิกรณ์ต่อเนื่องที่ใช้ก๊าซเป็นตัวนำความร้อน กล่าวคือ มีอุณหภูมิสูงที่บริเวณด้านล่างและค่อย ๆ ลดลงตามความสูงของเตาปฏิกรณ์ที่ห่างออกไปจากแหล่งให้ความร้อน ซึ่งคือ เตาปฏิกรณ์ชนิด SRSB (slot-rectangular spouted bed reactor) ซึ่งมีค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดคือ 35 องศาเซลเซียส และ 174 องศาเซลเซียส/เมตร ตามลำดับ (Wang et al, 2018) [49] ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติและใช้ขี้เลื่อยเป็นตัวอย่างการทดลองเช่นกัน

ในช่วงพฤติกรรมคงตัวเตาปฏิกรณ์มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน โดยมีอัตราการให้ความร้อน 2.33, 1.29 และ 1.41 องศาเซลเซียส/ นาที สำหรับอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวแล้วมีการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์จะลดลงไปที่อุณหภูมิใกล้เคียงค่าเดิม คือ 183.67, 242.5 และ 235.05 องศาเซลเซียส สำหรับอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์จะมีค่ามากที่สุดที่ด้านล่างเตาและค่อย ๆ ลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากชีวมวลมีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อน และ ชีวมวลด้านบนเป็นชีวมวลที่เพิ่งถูกป้อนเข้าสู่ระบบจึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณด้านบนของเตาปฏิกรณ์สูงกว่าบริเวณอื่น จึงเป็นเหตุให้อุณหภูมิชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์มีลักษณะการกระจายตัวดังแสดงในภาพที่ 45 – 47 เพราะฉะนั้นการใช้งานเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องหากสังเกตจากพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ในช่วงพฤติกรรมคงตัวพบว่า ควรใช้งานหลังจากเตาปฏิกรณ์เริ่มทำงานไปแล้ว 250, 230 และ 225 นาที สำหรับอุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้จากการเปรียบการทำงานกับเตาปฏิกรณ์

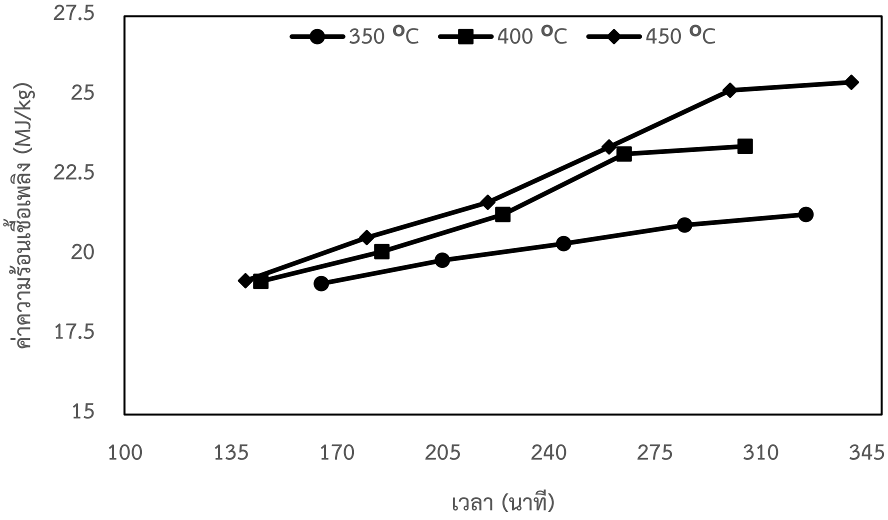
ชนิดต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องพบว่าเตาปฏิกรณ์สามารถทำงานได้โดยมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันดังกล่าวไว้ข้างต้น

4.3 คุณสมบัติเชื้อเพลิง

การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงของชีวมวลขี้เลื่อยหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง ประกอบไปด้วย ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, ค่าความหนาแน่นบัลค์, และค่าความหนาแน่นพลังงาน ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

ผลการทดลองค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเปลี่ยนแปลงและ ช่วงพฤติกรรมคงตัว ดังแสดงในภาพที่ 48 และ 49 ตามลำดับ



ภาพที่ 48 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลเทียบกับเวลาภายในเตาปฏิกรณ์

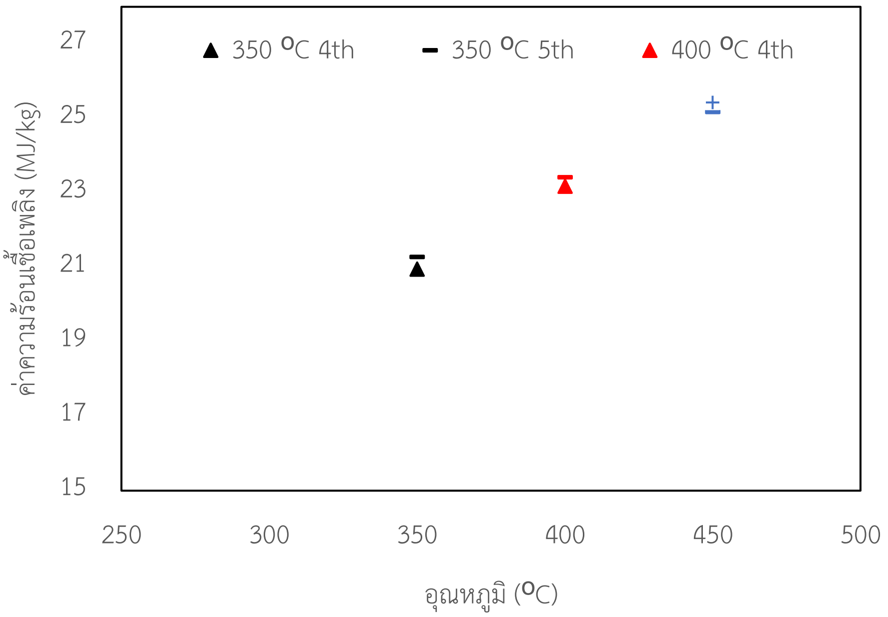
จากภาพที่ 48 กราฟแสดงค่าความร้อนเชื้อเพลิงในช่วงเปลี่ยนแปลง มีแกนตั้งเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิง แกนนอนเป็นเวลาที่ชีวมวลบรรจุอยู่ในเตาปฏิกรณ์ ข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ชุด ตามอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ในชีวมวลลำดับที่ 1 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 19.11, 19.18 และ 19.20 MJ/kg สำหรับกรณี เวลา 165 145 และ 140 นาที 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ชีวมวลในลำดับถัดมาจะมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น กรณี 350 องศาเซลเซียส 19.11, 19.84, 20.36, 20.95 และ 21.28

MJ/kg 165, 205, 245, 285 และ 325 นาที กรณี 400 องศาเซลเซียส 19.18, 20.11, 21.28, 23.18 และ 23.42 MJ/kg 145, 185, 225, 265 และ 305 นาที สำหรับชีวมวลชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส 19.20, 20.55, 21.66, 23.4, 25.17 และ 25.43 MJ/kg 140, 180, 220, 260, 300 และ 340 นาที สำหรับชีวมวลชุดที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ หากเปรียบเทียบกับชีวมวลในลำดับเดียวกัน อุณหภูมิห้องให้ความร้อนสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงขึ้น ที่ชีวมวลลำดับที่ 2 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 19.84, 20.11 และ 20.55 MJ/kg ชีวมวลลำดับที่ 3 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 20.36, 21.28 และ 21.66 MJ/kg สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะของฟังก์ชั่นที่แปรผันตรงกัน

จากภาพที่ 48 สังเกตค่าความร้อนเชื้อเพลิงเทียบกับเวลาพบว่าเมื่อกระบวนการดำเนินไปจนถึงการป้อนชีวมวลลำดับที่ 4 จะพบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะเริ่มคงที่โดยสังเกตลักษณะแนวโน้มของเส้นกราฟเริ่มเปลี่ยนความชันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อสังเกตผลการทดลองจากค่าความร้อนเชื้อเพลิงแล้ว เตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวหลังจากการป้อนชีวมวลในลำดับที่ 4 ที่เวลา 285 และ 265 นาที สำหรับกรณี 350 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส จะเริ่มเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวหลังจากการป้อนชีวมวลลำดับที่ 5 ที่เวลา 300 นาที จากการสังเกตภาพที่ 42 – 44 สังเกตเห็นว่าในช่วงเวลาในการป้อนชีวมวลลำดับที่ 1 – 3 การกระจายอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงและมีพฤติกรรมไม่คงตัว คือ อุณหภูมิที่สูงขึ้น สอดคล้องกับค่าความร้อนเชื้อเพลิงดังแสดงในภาพที่ 48 ซึ่งมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ชีวมวลอยู่ในเตาปฏิกรณ์ในช่วงเปลี่ยนแปลง สำหรับกรณี 350 และ 400 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิงเริ่มคงตัวหลังจากเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวคือที่ 285 และ 265 นาที ส่วนในกรณี 450 องศาเซลเซียส พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เริ่มคงตัวที่เวลา 260 นาที แต่หากสังเกตจากค่าความร้อนเชื้อเพลิงแล้วจะมีพฤติกรรมคงตัวที่เวลา 305 นาที ซึ่งเป็นชีวมวลลำดับที่ 5

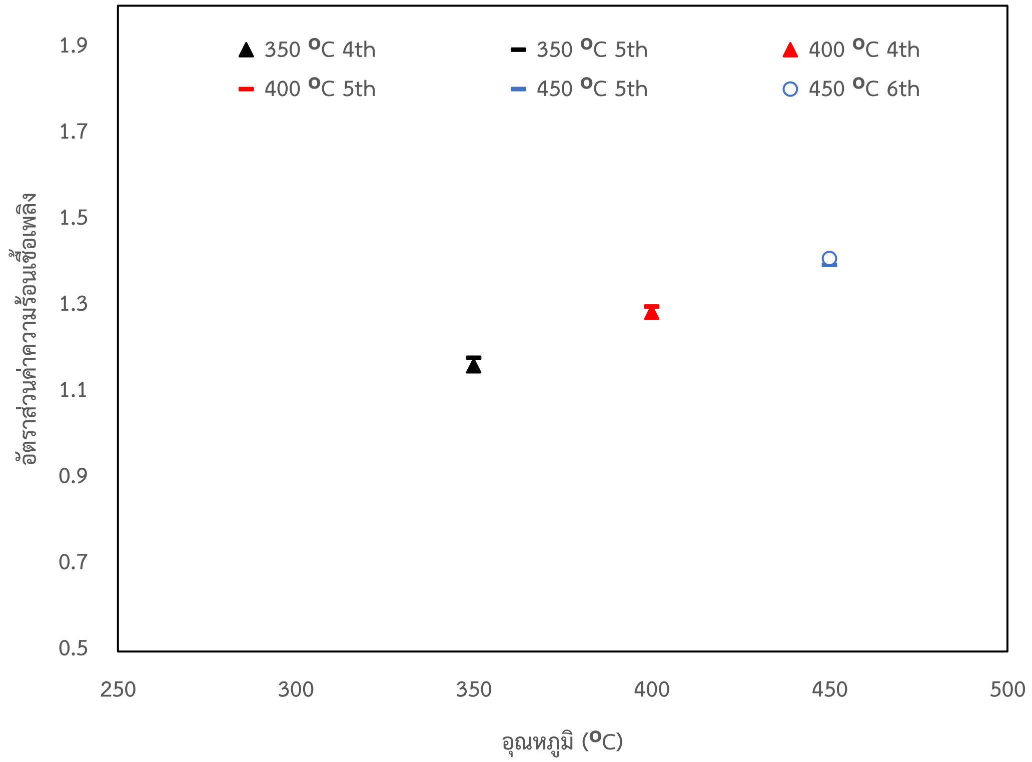
จากการสังเกตค่าความร้อนเชื้อเพลิงในภาพที่ 48 พบว่าในช่วงเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์ทั้งกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียสซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ดงัแสดงในภาพที่ 42 – 44 ในช่วงเปลี่ยนแปลงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ค่อย ๆ สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ค่อย ๆ ขยับสูงขึ้นเช่นกัน 19.11, 19.84, และ 20.36 MJ/kg สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส 19.18, 20.11 และ 21.28 MJ/kg สำหรับกรณี 400 องศาเซลเซียส และ 19.20, 20.55, 21.66 และ 23.4 MJ/kg เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 48 แล้วการใช้งานเตา

ปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนควรเริ่มใช้ในชีวมวลชุดที่ 4 ที่เวลา 285 และ 265 นาที สำหรับกรณี 350 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่กรณี 450 องศาเซลเซียส ควรเริ่มใช้งานเตาปฏิกรณ์ที่ชีวมวลลำดับที่ 5 ที่เวลา 300 นาที ซึ่งเป็นจุดที่แนวโน้มของเส้นกราฟเริ่มเปลี่ยนแปลงเข้าสู่เส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมคงตัวของเตาปฏิกรณ์



ภาพที่ 49 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว

มหาวิทยาลัยศิลปากร



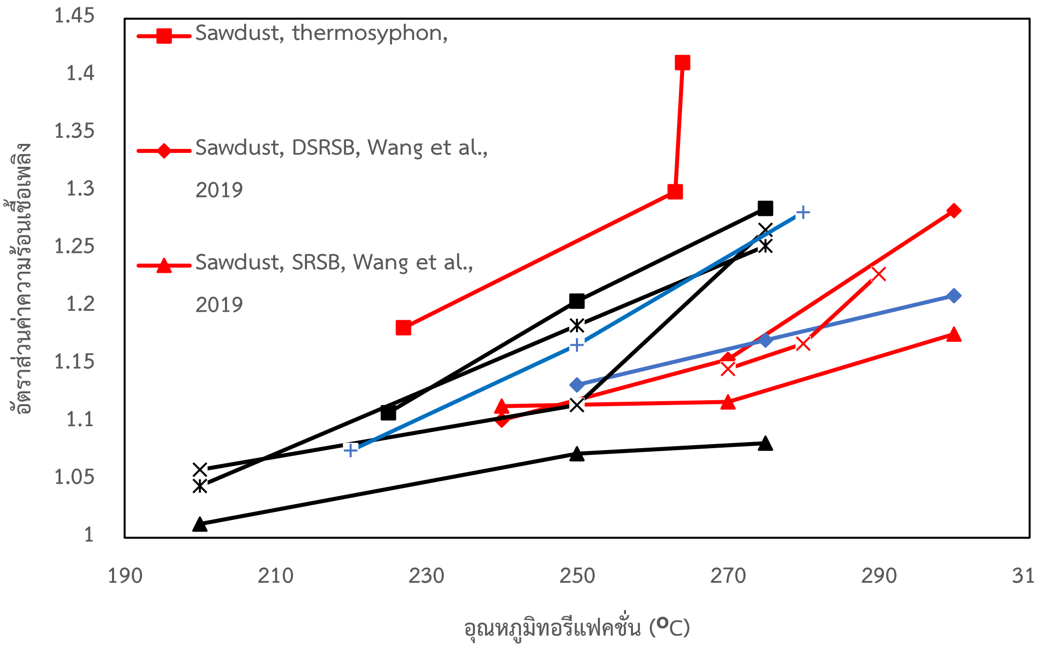
ภาพที่ 50 อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว

จากภาพที่ 49 เป็นกราฟแสดงค่าความร้อนเชื้อเพลิงในช่วงพฤติกรรมคงตัวของเตาปฏิกรณ์ แกนตั้งคือค่าความร้อนเชื้อเพลิง แกนนอนคืออุณหภูมิห้องให้ความร้อนเชื้อเพลิง สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 20.95 และ 21.28 MJ/kg ที่เวลา 285 และ 325 นาที กรณี 400 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 23.18 และ 23.42 MJ/kg ที่เวลา 265 และ 305 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 4 และ 5 ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 25.17 และ 25.43 MJ/kg ที่เวลา 300 และ 340 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 5 และ 6 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนเพิ่มขึ้นค่าความร้อนเชื้อเพลิงก็จะเพิ่มขึ้นตามเช่นกันซึ่งเป็นลักษณะความสัมพันธ์แบบฟังก์ชั่นที่แปรผันตรงกัน ในช่วงพฤติกรรมคงตัวค่าความร้อนเชื้อเพลิงในแต่ละกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าต่างกันเพียง 0.33, 0.24 และ 0.26 MJ/kg สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากภาพที่ 50 เป็นกราฟแสดงอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงในช่วงพฤติกรรมคงตัวของเตาปฏิกรณ์ แกนตั้งคืออัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิง แกนนอนคืออุณหภูมิห้องให้ความร้อน

เชื้อเพลิง สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิง 1.164 และ 1.182 ที่เวลา 285 และ 325 นาที กรณี 400 องศาเซลเซียส อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิง 1.288 และ 1.301 ที่เวลา 265 และ 305 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 4 และ 5 ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิง 1.39 และ 1.412 ที่เวลา 300 และ 340 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

จากภาพที่ 48 ช่วงเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ค่อย ๆ สูงขึ้นในแต่ละครั้งที่มีการบรรจุชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก คือ ชีวมวลลำดับที่ 1, 2 และ 3 ที่เวลา 165, 205 และ 240 ตามลำดับ สำหรับกรณี 350 และ ที่เวลา 145, 185 และ 225 นาที ตามลำดับ สำหรับกรณี 400 องศาเซลเซียส และ ชีวมวลลำดับที่ 1, 2, 3 และ 4 ที่เวลา 140, 180, 220 และ 260 นาที ตามลำดับ สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากเตาปฏิกรณ์ยังไม่เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จึงยังคงเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น จึงมีผลให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลในแต่ละลำดับที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์มีค่าเปลี่ยนแปลงและเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิง เมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูงขึ้นจะมีผลให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน [1] ภาพที่ 49 ช่วงพฤติกรรมคงตัว ค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะมีค่าใกล้เคียงกันโดยต่างกันเพียง เพียง 0.33, 0.24 และ 0.26 MJ/kg คิดเป็น 1.55%, 1.02% และ 1.02% สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเตาปฏิกรณ์มีพฤติกรรมและลักษณะการกระจายอุณหภูมิคงที่ตัว และเมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนสูงขึ้นค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก็จะสูงด้วยเช่นกัน มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าความร้อนเชื้อเพลิงในช่วงเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 51 อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงร่วมกับงานวิจัยสืบค้น [5, 33, 49, 51-54]

ภาพที่ 51 แสดงอัตราค่าความร้อนเชื้อเพลิงในแนวแกนตั้ง และอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในแนวแกนนอน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลที่มีค่าพลังงานสูงขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ชนิดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาทอรีแฟคชั่นใกล้เคียงกันที่ประมาณ 30 - 45 นาที ชีวมวลขี้เลื่อยหลังผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องแล้วมีอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 1.067 – 1.412 เมื่อเปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่นแล้ว เตาปฏิกรณ์ชนิดท่อ มีอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 1.031 – 1.367 [5] ,1.149 – 1.298 และ 1.109 – 1.285, สำหรับเตาปฏิกรณ์ชนิดแบชระดับห้องปฏิบัติการ [53] เตาปฏิกรณ์ชนิดควอท [54] และ เตาปฏิกรณ์ชนิดฟิกซ์เบด [5] ตามลำดับ พบว่าค่าอัตราส่วนความร้อนเชื้อพลิงของเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูง นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มเช่นเดียวกับเตาปฏิกรณ์ที่ทำการสืบค้น คือ เมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูงขึ้นอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงก็จะสูงขึ้นเช่นกัน

จากภาพที่ 51 เมื่อสังเกตการทอรีแฟคชั่นขี้เลื่อยด้วยเตาปฏิกรณ์ชนิด SDSB, DSDSB และเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แล้วพบว่าอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของขี้เลื่อยนั้นมีค่าอยู่ในช่วงกลางของการทอรีแฟคชั่นชีวมวลชนิดอื่น ๆ กับเตาปฏิกรณ์ทั่วไปดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เตาปฏิกรณ์ชนิด DSDSB ได้ถูกดัดแปลงมาจากเตาปฏิกรณ์ชนิด SDSB ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าความชัน

ของกราฟมีค่าสูง จาก 0.00104 เป็น 0.00303 และความชันของกราฟสำหรับเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด คือ 0.00411 แสดงให้เห็นว่า ขี้เลื่อยมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงขึ้นกว่าเดิมมากเมื่อเทียบการชีวมวลดิบ ค่าความชันของกราฟที่มากขึ้นนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นของชีวมวลหลังจากผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์นั้น ๆ ซึ่งการทอรีแฟคชั่นขี้เลื่อยด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนนั้นให้ค่าความชั่นที่สูงกว่าการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ชนิด DSDSB และเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด คือ มีค่า 0.00697 และยังมีความชันที่สูงเมื่อเทียบกับเตาปฏิกรณ์และชีวมวลชนิดอื่นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 51 เพราะฉะนั้นการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องจึงมีนัยสำคัญที่ทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงระบุได้ว่าการทำงานของเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนอยู่ในช่วงที่สามารถปฏิบัติงานได้ดี และ สามารถทำงานได้ในแนวโน้มเช่นเดียวกับเตาปฏิกรณ์อื่น ๆ

จากภาพที่ 51 เมื่อเปรียบเทียบชีวมวลขี้เลื่อยที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนร่วมกับเตาปฏิกรณ์ DSRSB, ฟลูอิไดซ์เบด และ SRSB แล้วพบว่า (สีแดง) พบว่าเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีผลให้ชีวมวลขี้เลื่อยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนเชื้อเพลิงได้สูงมากกว่าเตาปฏิกรณ์ดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความชันของเส้นกราฟร่วมกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ พบว่าเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีค่าความชันสูงที่สุด คือ 0.00622 ตามด้วย เตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด 0.00411, เตาปฏิกรณ์ควอท 0.00354, เตาปฏิกรณ์ชนิดฟิกซ์เบด 0.00344, เตาปฏิกรณ์ DSRSB 0.00303, เตาปฏิกรณ์ชนิดท่อ 0.00277, เตาปฏิกรณ์ชนิดแบช 0.00155 และ เตาปฏิกรณ์ SRSB โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนมีการเรียงตัวของชีวมวลแบบบัลค์ จึงมีเวลาที่น้ำจะทำปฏิกิริยาในฐานะแคกตาลิสสูงซึ่งมีผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสูง [55] นอกจากนี้ภายในเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีการปรับการกระจายอุณหภูมิด้วยท่อเทอร์โมไซฟอน จากภาพที่ 51 แสดงให้เห็นว่าระดับของกระบวนการทอรีแฟคชั่นภายในเตาปฏิกรณ์สูงทั้งในกรณีที่เทียบกับชีวมวลชนิดเดียวกันและชีวมวลต่างชนิด

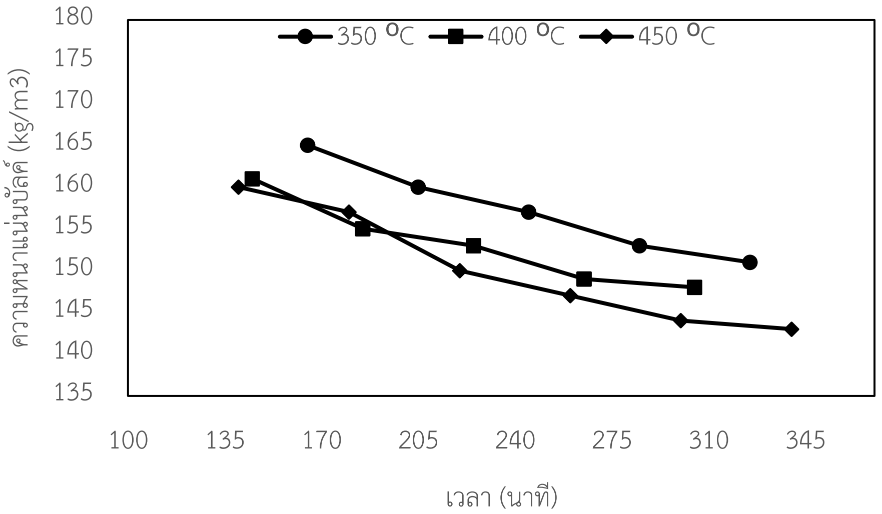
การควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีผลให้ชีวมวลถูกทอรีแฟคชั่นในช่วงพฤติกรรมคงตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 227, 263 และ264 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งค่าความร้อนเชื้อเพลิงจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น 20.95 และ 21.28 MJ/kg สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 23.18 และ 23.42 MJ/kg สำหรับกรณี 400 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 25.17 และ 25.43 MJ/kg สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงกับเตาปฏิกรณ์ประเภทอื่นดังภาพที่ 51 แล้วพบว่ามีค่า

อยู่ในเกณฑ์ที่สูง และมีแนวโน้มค่าความร้อนเชื่อเพลิงเช่นเดียวกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ ที่ทำการสืบค้นข้อมูล อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของขี้เลื่อยที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดต่อเนื่อง คือ 1.182 - 1.412 และมีความชัน 0.00697 ซึ่งมีค่ามากทีสุด

4.3.2 ค่าความหนาแน่นพลังงานและความหนาแน่นบัลค์

4.2.2 ความหนาแน่นบัลค์

ผลการทดลองค่าความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเปลี่ยนแปลงและ ช่วงพฤติกรรมคงตัว ดังแสดงในภาพที่ 50 และ 51 ตามลำดับ



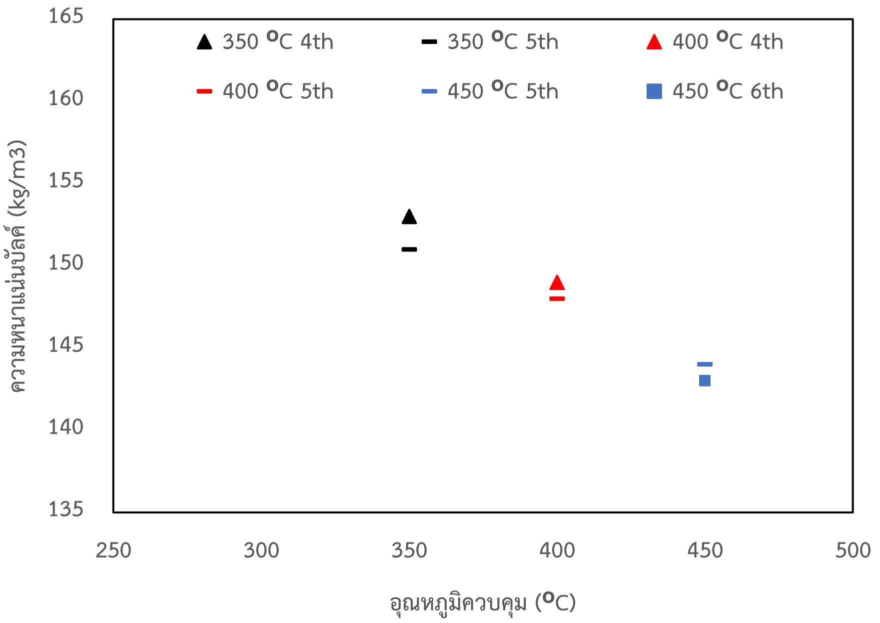
ภาพที่ 52 ความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลเทียบกับเวลาภายในเตาปฏิกรณ์

จากภาพที่ 52 เป็นกราฟแสดงค่าความหนาแน่นบัลค์โดยมีแกนตั้งเป็นค่าความหนาแน่นบัลค์ แกนนอนเป็นเวลาที่ชีวมวลบรรจุอยู่ในเตาปฏิกรณ์ ข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ชุด ตามอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส กรณี 350 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นบัลค์ คือ 165, 160, 157, 153 และ 151 kg/m^3 ที่เวลา 165, 205, 245, 285 และ 325 นาที กรณี 400 องศาเซลเซียส 161, 155, 153, 149 และ 148 kg/m^3 ที่เวลา 145, 185, 225, 265 และ 305 นาที สำหรับชีวมวลชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส 160, 157, 150, 147, 144 และ 143 kg/m^3 ที่เวลา 140, 180, 220, 260, 300 และ 340 นาที สำหรับชีวมวลชุดที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นบัลค์จะลดลงตามเวลาและลำดับชีวมวลที่

อยู่ในเตาปฏิกรณ์ หากเปรียบเทียบกับชีวมวลในลำดับเดียวกันเมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนสูงขึ้นค่าความหนาแน่นบัลค์จะลดลง ที่ชีวมวลลำดับที่ 1 ค่าความหนาแน่นบัลค์มีค่า 165, 161 และ 160 kg/m^3 ที่เวลา 165, 145 และ 140 นาที ที่ชีวมวลลำดับที่ 2 ค่าความหนาแน่นบัลค์ 160, 155 และ 157 kg/m^3 ที่เวลา 205, 185 และ 180 นาที ชีวมวลลำดับที่ 3 ค่าความหนาแน่นบัลค์ 157, 153 และ 150 kg/m^3 ที่เวลา 245, 225 และ 220 นาที สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สังเกตได้ว่าอุณหภูมิกับความหนาแน่นบัลค์เป็นลักษณะของฟังก์ชั่นที่แปรผกผันกัน

จากภาพที่ 52 ในช่วงเปลี่ยนแปลงพบว่าค่าความหนาแน่นบัลค์มีค่าลดลงตามลำดับชีวมวลที่ถูกบรรจุเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ ค่อย ๆ ลดลง จากชีวมวลลำดับที่ 1 – 3 สำหรับกรณี 350 และ 400 องศาเซลเซียส จากลำดับที่ 1 – 4 สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากเตาปฏิกรณ์ยังไม่เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จึงยังคงเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น จึงมีผลให้ค่าความหนาแน่นบัลค์ในแต่ละช่วงเวลาและลำดับที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์มีค่าเปลี่ยนแปลงและลดลงตามอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิง เมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูงขึ้นจะมีผลให้ค่าความหนาแน่นบัลค์ [1]

จากการสังเกตค่าความร้อนเชื้อเพลิงในภาพที่ 52 พบว่าในช่วงเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นบัลค์เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์ทั้งกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียสซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 42 – 44 ในช่วงเปลี่ยนแปลงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ค่อย ๆ สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นบัลค์ซึ่งค่อย ๆ ลดลง 165, 160, 157, 153 และ 151 kg/m^3สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส 161, 155, 153, 149 และ 148 kg/m^3 สำหรับกรณี 400 องศาเซลเซียส และ 160, 157, 150, 147, 144 และ 143 kg/m^3 สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 52 แล้วการใช้งานเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนควรเริ่มใช้ในชีวมวลชุดที่ 4 ที่เวลา 285 และ 265 นาที สำหรับกรณี 350 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่กรณี 450 องศาเซลเซียส ควรเริ่มใช้งานเตาปฏิกรณ์ที่ชีวมวลลำดับที่ 5 ที่เวลา 300 นาที ซึ่งเป็นจุดที่แนวโน้มของเส้นกราฟเริ่มเปลี่ยนแปลงเข้าสู่เส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมคงตัวของเตาปฏิกรณ์ ค่าความหนาแน่นบัลค์หลังจากระยะเวลาดังกล่าวจะมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 153 และ 151 kg/m^3 ผลต่างคือ 2 kg/m^3 คิดเป็น 1.3% สำหรับ 350 องศาเซลเซียส 149 และ 148 kg/m^3 ผลต่างคือ 1 kg/m^3 คิดเป็น 0.6%สำหรับ 400 องศาเซลเซียส 144 และ 143 kg/m^3 ผลต่างคือ 1 kg/m^3 คิดเป็น 0.69% สำหรับ 450 องศาเซลเซียส จากค่าผลต่างของความหนาแน่นบัลค์ในแต่ละกรณีแสดงให้เห็นว่าเตาปฏิกรณ์ได้เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวและสามารถใช้งาน

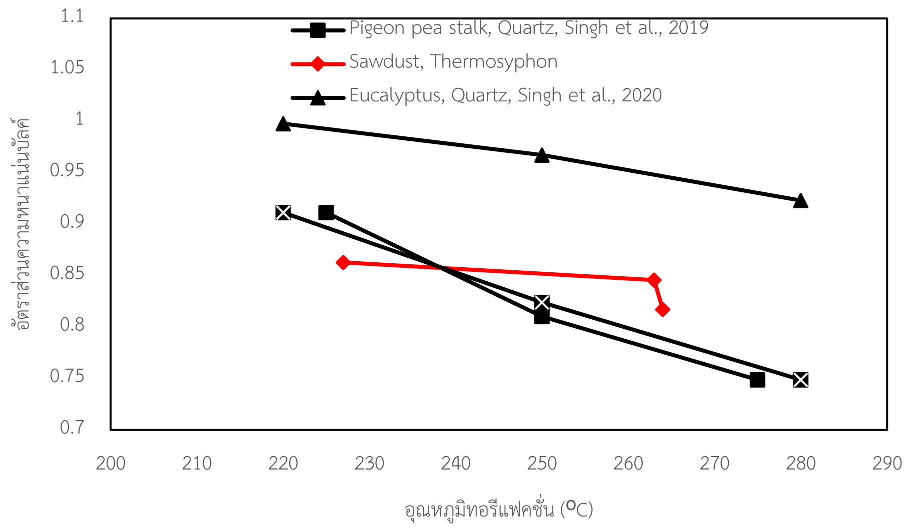


ภาพที่ 53 ความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว

จากภาพที่ 53 เป็นกราฟแสดงค่าความหนาแน่นบัลค์ในช่วงพฤติกรรมคงตัวของเตาปฏิกรณ์ แกนตั้งคือค่าความความหนาแน่นบัลค์ แกนนอนคืออุณหภูมิห้องให้ความร้อนเชื้อเพลิง สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นบัลค์ 153 และ 151 kg/m^3 ที่เวลา 285 และ 325 นาที กรณี 400 องศาเซลเซียส ค่าความหนาบัลค์ 149 และ 148 kg/m^3 ที่เวลา 265 และ 305 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 4 และ 5 ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นบัลค์ 144 และ 143 kg/m^3 ที่เวลา 300 และ 340 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 5 และ 6 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นบัลค์ก็จะลดลงตามเช่นกันซึ่งเป็นลักษณะความสัมพันธ์แบบฟังก์ชั่นที่แปรผกผันกัน ในช่วงพฤติกรรมคงตัวค่าความหนาแน่นบัลค์ในแต่ละกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าต่างกันเพียง 2, 1 และ 1 kg/m^3 สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากภาพที่ 53 เมื่อเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัว ค่าความหนาแน่นบัลค์ในแต่ละลำดับชีวมวลมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับลำดับชีวมวลที่ 4 และ 5 ค่าความหนาแน่นบัลค์ของกรณี 350 องศาเซลเซียส คือ 153 และ 151 kg/m^3 ที่เวลา 285 และ 325 นาที ผลต่างคือ 2 kg/m^3 คิดเป็น 1.3% กรณี 400 องศาเซลเซียส คือ 149 และ 148 kg/m^3 ที่เวลา 265 และ 305 นาที ผลต่างคือ 1 kg/m^3 คิดเป็น 0.67% ลำดับชีวมวลที่ 5 และ 6 สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส คือ 144

และ 143 kg/m^3 ที่เวลา 300 และ 340 นาที ผลต่างคือ 1 kg/m^3 คิดเป็น 0.69% ค่าความหนาแน่นบัลค์ในช่วงพฤติกรรมคงตัวนี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนสูงขึ้นซึ่งเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับช่วงเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 54 อัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์เทียบร่วมกับงานวิจัยสืบค้น [52] [54]

จากที่ 54 พบว่าชีวมวลขี้เลื่อยเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นจากเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องมีแนวโน้มเช่นเดียวกับชีวมวลก้านถั่วแระ, ยูคาลิปตัส และอคาเซีย ที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ท่อควอท และ เตาปฏิกรณ์ฟิกส์เบด คือ เมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลลดลง โดยค่าอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ มีค่าเท่ากับ 0.862 – 0.817, 0.997 – 0.923, 0.913 – 0.749 [54] และ 0.911 – 0.748 [52] สำหรับชีวมวลขี้เลื่อยจากเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอน, ชีวมวลยูคาลิปตัสขากเตาปฏิกรณ์ควอท, ชีวมวลอคาเซียจากเตาปฏิกรณ์ฟิกซ์เบด และชีวมวลเคจันจากเตาปฏิกรณ์ท่อควอท ตามลำดับ ซึ่งความชันของอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ระบุได้ถึงการสูญเสียมวลของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์นั้น ๆ จากภาพที่ 51 พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงโดยค่าอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์และอุณหภูมิทอรีแฟคชั้นมีความสัมพันธ์กันในลักษณะฟังก์ชั่นแปรผกผันต่อกัน และพบว่าเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีแนวโน้มค่าอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์เช่นเดียวกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ ที่ทำการสืบค้นข้อมูล

จากภาพที่ 54 การเปรียบเทียบอัตรส่วนความหนาแน่นบัลค์ร่วมกับงานวิจัยสืบค้นพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับชีวมวลอคาเซียและก้านถั่วแระ หาดพิจารณาความชันของกราฟพบว่าชีวมวลยู

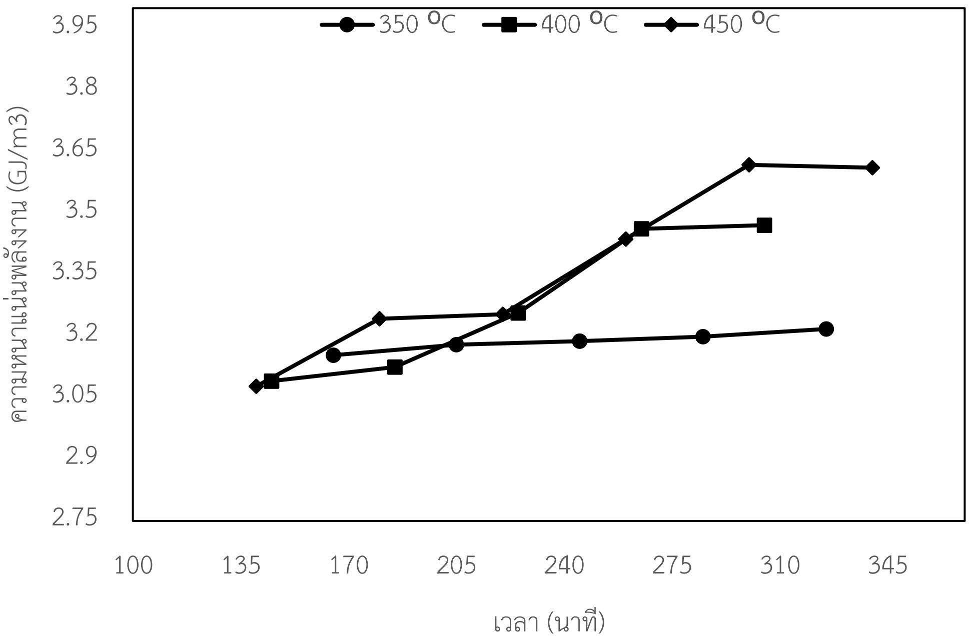
คาลิปตัสที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ควอทมีความชัน -0.00124, ชีวมวลอคาเซียที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ชนิดท่อมีความชัน -0.00271, ชีวมวลก้านถั่วแระที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ควอทมีความชัน -0.00325 และ ชีวมวลขี้เลื่อยที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาเทอร์โมไซฟอนมีความชัน -0.00124 พบว่าขี้เลื่อยและยูคาลิปตัสมีค่าความชันที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการสลายตัวที่คล้ายกันเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงประเภทไม้เช่นเดียวกัน แต่หากพิจารณาที่อัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์แล้วพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับก้านถั่วแระและอคาเซีย ซึ่งแสดงให้ถึงความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนซึ่งมีการสลายตัวที่สูง จึงมีผลให้ค่าความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลลดลง

การควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีผลให้ชีวมวลถูกทอรีแฟคชั่นในช่วงพฤติกรรมคงตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 227, 263 และ264 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งค่าความหนาแน่นบัลค์จากกระบวนการทอรีแฟคชั่น 153 และ 151 kg/m^3 สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 149 และ 148 kg/m^3 สำหรับกรณี 400 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 144 และ 143 MJ/kg สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นบัลค์กับเตาปฏิกรณ์ประเภทอื่นดังภาพที่ 51 แล้วพบว่ามีแนวโน้มค่าความหนาแน่นบัลค์เช่นเดียวกับเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่น ที่ทำการสืบค้นข้อมูล

4.2.3 ค่าความหนาแน่นพลังงาน

ผลการทดลองค่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเปลี่ยนแปลงและ ช่วงพฤติกรรมคงตัว ดังแสดงในภาพที่ 54 และ 55 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 55 ความหนาแน่นพลังงานของชีวมวล

จากภาพที่ 55 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นพลังงานในช่วงเปลี่ยนแปลง มีแกนตั้งเป็นค่าความหนาแน่นพลังงาน แกนนอนเป็นเวลาที่ชีวมวลบรรจุอยู่ในเตาปฏิกรณ์ ข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ชุด ตามอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส กรณี 350 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นพลังงาน คือ 3.154, 3.18, 3.188, 3.199 และ 3.218 GJ/m^3 ที่เวลา 165, 205, 245, 285 และ 325 นาที กรณี 400 องศาเซลเซียส 3.091, 3.125, 3.257, 3.462 และ 3.471 GJ/m^3 ที่เวลา 145, 185, 225, 265 และ 305 นาที สำหรับชีวมวลชุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส 3.078, 3.243, 3.254, 3.437, 3.618 และ 3.611 GJ/m^3 ที่เวลา 140, 180, 220, 260, 300 และ 340 นาที สำหรับชีวมวลชุดที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นพลังงานจะเพิ่มขึ้นตามลำดับและระยะเวลาชีวมวลที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์ หากเปรียบเทียบกับชีวมวลในลำดับเดียวกันแล้ว เมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนสูงขึ้นค่าความหนาแน่นพลังงานจะลดลงในชีวมวลลำดับที่ 1 ที่เวลา 165, 145 และ 140 นาที ค่าความหนาแน่นพลังงานมีค่า 3.154, 3.091 และ 3.078 GJ/m^3 เพิ่มขึ้นในชีวมวลลำดับที่ 2 ที่เวลา 205, 185 และ 180 นาที ค่าความหนาแน่นพลังงาน 3.18, 3.125 และ 3.243 GJ/m^3 และในชีวมวลลำดับที่ 3 ที่เวลา 245, 225 และ 220 นาที ค่าความหนาแน่นบัลค์ 3.188, 3.257 และ 3.254 GJ/m^3 สำหรับกรณี 350,

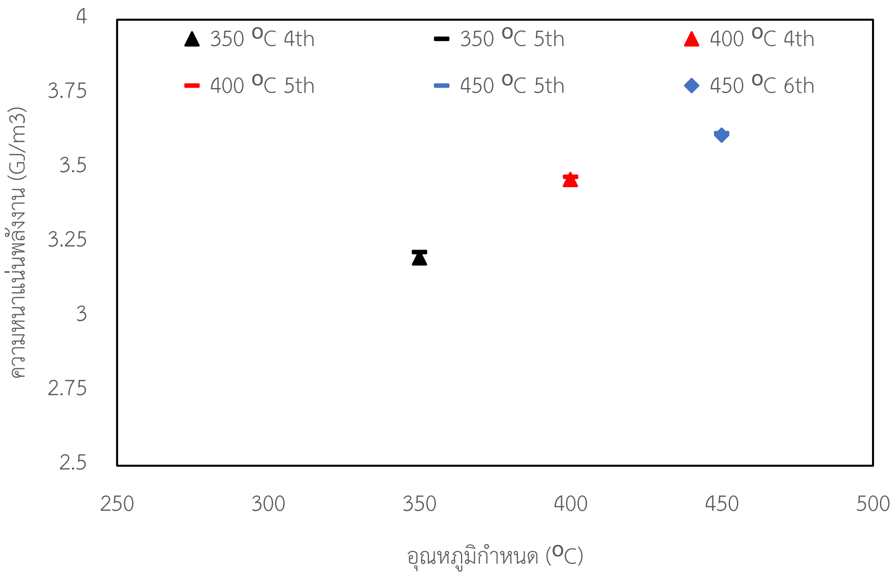
400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สังเกตได้จากข้อมูลที่กล่าวไว้ข้างต้น อุณหภูมิกับความหนาแน่นพลังงานเป็นลักษณะของฟังก์ชั่นที่แปรผันตรงกัน

จากภาพที่ 55 ค่าความหนาแน่นพลังงานในช่วงเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาและลำดับชีวมวล เมื่อสังเกตจากผลการทดลองในกรณีอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นพลังงานคือ 3.154, 3.18 และ 3.188 GJ/m^3 ที่เวลา 165, 205 และ 245 นาที ในกรณี 400 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นพลังงาน คือ 3.091, 3.125 และ 3.257 GJ/m^3 ที่เวลา 145, 185 และ 225 นาที สำหรับลำดับชีวมวลที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในกรณี 450 องศาเซลเซียส 3.078, 3.243, 3.254 และ 3.437 GJ/m^3 ที่เวลา 140, 180, 220 และ 260 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ เนื่องจากเตาปฏิกรณ์ยังไม่เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จึงยังคงเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น จึงมีผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลในแต่ละลำดับที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์มีค่าเปลี่ยนแปลงและเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิง เมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูงขึ้นจะมีผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้นด้วยเช่นกัน [1]

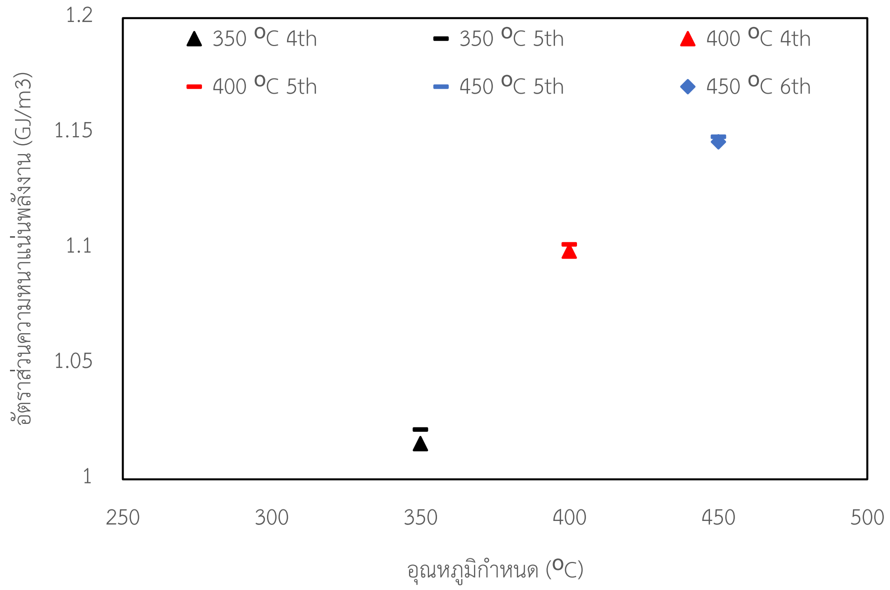
จากการสังเกตผลการทดลองตามภาพที่ 55 พบว่าเมื่อชีวมวลอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนแก่ชีวมาล เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นค่าความหนาแน่นพลังงานจะมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกันดังที่อธิบายไว้ข้างต้น ความชันของกราฟจะเริ่มเปลี่ยนแปลงและเข้าใกล้เส้นตรงเมื่อเวลาผ่านไป 285, 265 และ 300 นาที สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 42 – 44 คือ ที่เวลาดังกล่าวเตาปฏิกรณ์ได้เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวค่าความหนาแน่นจึงเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันจึงมีผลให้ความชันของกราฟในช่วงดังกล่าวเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับเส้นตรง พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเตรียมเตาปฏิกรณ์เพื่อให้พร้อมใช้งาน เนื่องจากระยะเวลาหลังจาก 285, 265 และ 300 นาที สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นต้นไปนั้นค่าความหนาแน่นเชื้อเพลิงไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เวลาในการเตรียมเตาปฏิกรณ์มากไปกว่านี้

จากภาพที่ 55 เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นพลังงานร่วมกับการกระจายอุณหภูมิจากภาพที่ 44 – 44 พบว่าเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องใช้เวลาในการเตรียมเตาปฏิกรณ์ก่อนข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัว เป็นเวลา 285, 265 และ 300 นาที สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงที่ความชันของกราฟจากภาพที่ 52 เริ่มเปลี่ยนเข้าสู่เส้นตรงขนานกับแกนนอนค่าความหนาแน่นพลังงานเริ่มมีค่าคงที่ 3.199, 3.218 GJ/m^3 สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส 3.462, 3.471 GJ/m^3 สำหรับกรณี 400 องศาเซลเซียส และ

3.618, 3.611 GJ/ m^3 สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย คือ 0.59%, 0.25% และ 0.19% สำหรับ กรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 56 ความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว

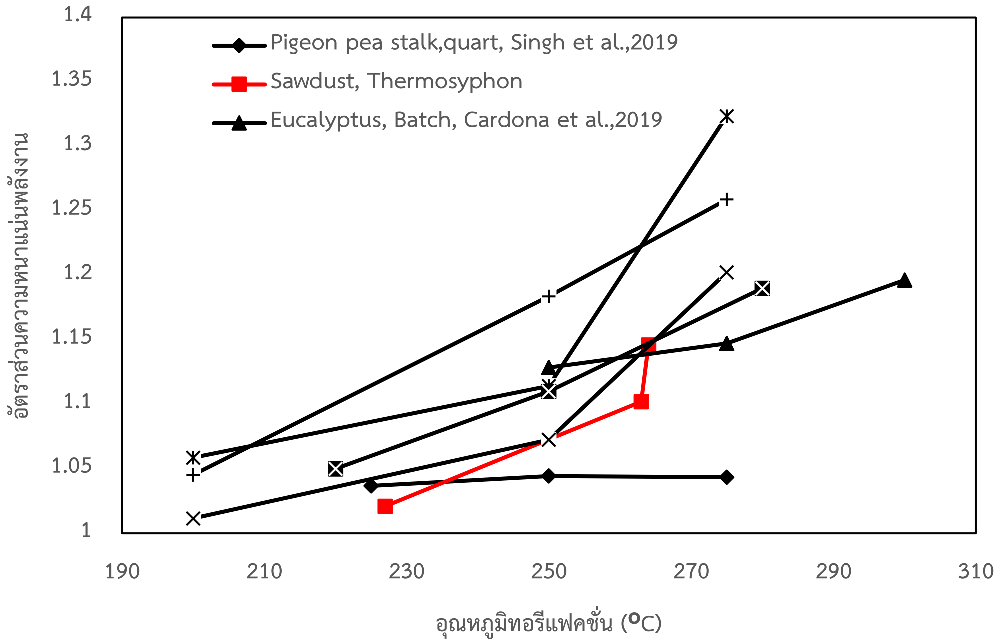


ภาพที่ 57 อัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลในช่วงพฤติกรรมคงตัว

จากภาพที่ 56 เป็นกราฟแสดงค่าความหนาแน่นพลังงานในช่วงพฤติกรรมคงตัวของเตาปฏิกรณ์ แกนตั้งคือค่าความความหนาแน่นพลังงาน แกนนอนคืออุณหภูมิห้องให้ความร้อนเชื้อเพลิง สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นพลังงาน 3.199 และ 3.218 GJ/m^3 ที่เวลา 285 และ 325 นาที กรณี 400 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นพลังงาน 3.462 และ 3.471 GJ/m^3 ที่เวลา 265 และ 305 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 4 และ 5 ตามลำดับ กรณี 450 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นพลังงาน 3.618 และ 3.611 GJ/m^3 ที่เวลา 300 และ 340 นาที สำหรับชีวมวลลำดับที่ 5 และ 6 ตามลำดับ หากเปรียบเทียบชีวมวลลำดับที่ 5 ซึ่งเป็นลำดับชีวมวลในช่วงที่พฤติกรรมคงตัวเตาปฏิกรณ์แล้วพบว่าเมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นพลังงานจะเพิ่มขึ้นตามเช่นกันซึ่งเป็นลักษณะความสัมพันธ์แบบฟังก์ชั่นที่แปรผันตรงกัน ในช่วงพฤติกรรมคงตัวค่าความหนาแน่นพลังงานในแต่ละกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกัน คือ มีค่าต่างกันเพียง 0.019, 0.009 และ 0.007 GJ/m^3 สำหรับกรณี 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากภาพที่ 56 เมื่อเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัว ค่าความหนาแน่นพลังงานในแต่ละลำดับชีวมวลจะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับลำดับชีวมวลที่ 4 และ 5 ค่าความหนาแน่นพลังงานของกรณี 350 องศาเซลเซียส ที่เวลา 285 และ 325 นาที คือ 3.199 และ 3.218 GJ/m^3 ผลต่างคือ 0.019 GJ/m^3 คิดเป็น 0.59% กรณี 400 องศาเซลเซียส ที่เวลา 265 และ 305 นาที คือ 3.462 และ 3.461 GJ/m^3 ผลต่างคือ 0.001 GJ/m^3 คิดเป็น 0.028% ลำดับชีวมวลที่ 5 และ 6 สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส ที่เวลา 300 และ 340 นาที คือ 3.618 และ 3.611 GJ/m^3 ผลต่างคือ 0.007 GJ/m^3 คิดเป็น 0.019% ค่าความหนาแน่นพลังงานในช่วงพฤติกรรมคงตัวนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิห้องให้ความร้อนสูงขึ้นซึ่งเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับช่วงเปลี่ยนแปลง

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 58 อัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเทียบกับงานวิจัยสืบค้น [5, 52-54]

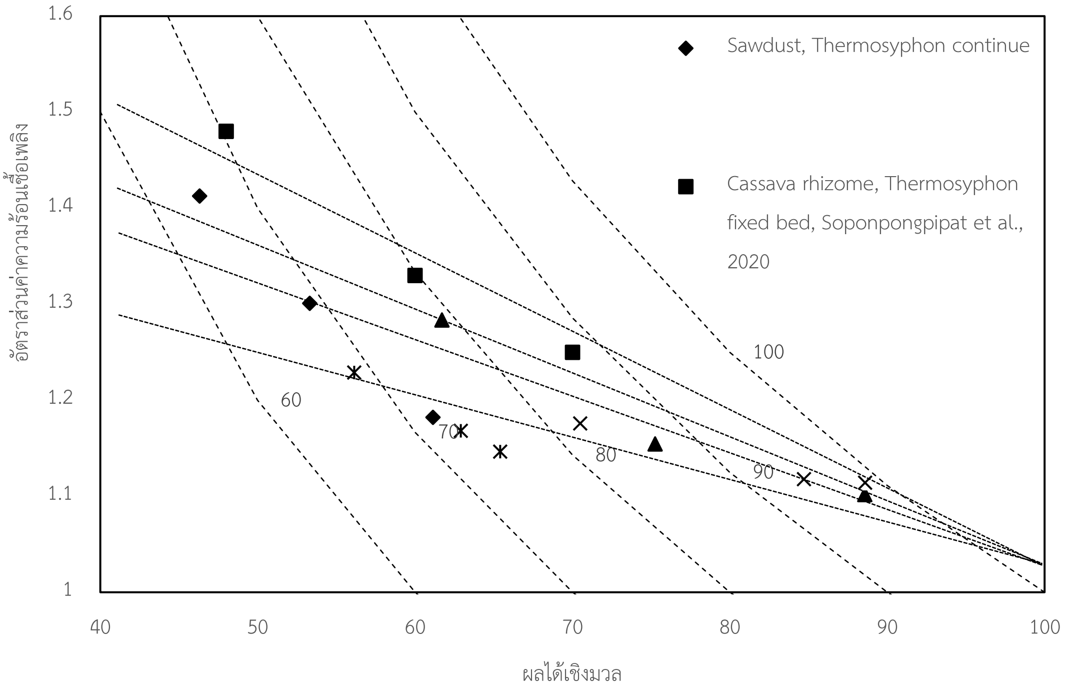
จากภาพที่ 58 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลขี้เลื่อยหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนกับชีวมวลก้านถั่วแระ, ยูคาลิปตัส, กากกาแฟ, กากยาจีน, สาหร่าย และ อคาเซีย พบว่า เมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่นเพิ่มสูงขึ้นอัตราส่วนค่าความหนาแน่นพลังงานก็จะสูงขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์แบบฟังก์ชั่นแปรผันตรงกัน โดย ชีวมวลขี้เลื่อยที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นในช่วง 227 – 264 องศาเซลเซียส ด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอน มีค่าอัตราส่วนความหนาแน่นพลังงาน 1.021 – 1.146 ชีวมวลก้านถั่วแระผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ควอทมีค่าอัตราส่วนความหนาแน่นพลังงาน 1.036 – 1.043 ชีวมวลยูคาลิปตัสผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ควอทมีค่าอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ 1.12 – 1.19 ชีวมวลกากกาแฟผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ชนิดท่อมีอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ 1.011 – 1.201 ชีวมวลกากยาจีนผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ชนิดท่อมีอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ 1.058 – 1.323 ชีวมวลสาหร่ายผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ชนิดท่อมีอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ 1.045 – 1.258 และชีวมวลอคาเซียผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ฟิกซ์เบดมีอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ 1.05 1.19

จากภาพที่ 58 พบว่าเส้นกราฟอัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลแต่ละชนิด คือ 0.00134, 0.003378, 0.001356, 0.002543, 0.003531, 0.002847, 0.000578 และ 0.002333 สำหรับก้านถั่วแระผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ควอท, ขี้เลื่อยผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอน, ยูคาลิปตัสผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์แบช, กากกาแฟ, กากยาจีน, สาหร่ายผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ท่อ, ยูคาลิปตัสผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ควอท และอคาเซียผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ฟิกซ์เบด ซึ่งเป็นแนวโน้มลักษณะเดียวกันกับการเทียบอัตราส่วนค่าความร้อนของเตาปฏิกรณ์ เนื่องจากค่าความร้อนเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณค่าความหนาแน่นพลังงาน จากภาพที่ 51 การเทียบอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของเตาปฏิกรณ์พบว่าชีวมวลที่สืบค้นให้ผลในแนวโน้มลักษณะเดียวกัน จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนค่าความหนาแน่นพลังงานดังแสดงในภาพที่ 58 จึงเห็นว่าเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นมีพฤติกรรมดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่นในลักษณะเดียวกันกับเตาปฏิกรณ์ที่สืบค้นข้อมูล และมีอัตราส่วนค่าความหนาแน่นพลังงานอยู่ในเกณฑ์ที่สูงหากเทียบกับการทอรีแฟคชั่นจากเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่นโดยสังเกตจากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งเป็นผลมาจากการการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงเนื่องจากเมื่อสังเกตจากภาพที่ 54 พบว่าค่าอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลขี้เลื่อยที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีค่าต่ำแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียมวลไปจากการสลายตัวของชีวมวล

ค่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลขี้เลื่อยหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอรโมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องเมื่ออยู่ในช่วงพฤติกรรมคงตัวในสภาวะที่เตาปฏิกรณ์พร้อมใช้งานแล้ว ชีวมวลลำดับที่ 4 และ 5 สำหรับกรณี 350 องศาเซลเซียส ที่เวลา 285 และ 325 นาที คือ 3.199 และ 3.218 GJ/m^3 กรณี 400 องศาเซลเซียส ที่เวลา 265 และ 305 นาที คือ 3.462 และ 3.461 GJ/m^3 ลำดับชีวมวลที่ 5 และ 6 สำหรับกรณี 450 องศาเซลเซียส ที่เวลา 300 และ 340 นาที คือ 3.618 และ 3.611 GJ/m^3 จากภาพที่ 58 พบว่าค่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลขี้เลื่อยมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถทำงานได้ดี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสูงขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยสืบค้น

4.4 การสลายตัวของชีวมวลและผลได้พลังงาน

การเปรียบข้อมูลของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องร่วมกับงานวิจัยสืบค้นโดยเทียบด้วยเส้นค่าความหนาแน่นพลังงานเพื่อทำการเปรียบการทำงานของเตาปฏิกรณ์ โดยในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงอยู่บนเส้นค่าความหนาแน่นพลังงานเดียวกันนั้น อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงกว่าแสดงให้เห็นว่าเป็นกรณีที่ดีกว่า



ภาพที่ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความร้อนเชื้อเพลิง - ผลผลิตเชิงมวล และเส้น iso – energy yield ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเทียบกับงานวิจัยสืบค้น [33, 49-51]

จากภาพที่ 59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความร้อนเชื้อเพลิงกับผลผลิตเชิงมวล เทียบกับค่าผลได้พลังงาน โดยแกนตั้งคืออัตราส่วนความร้อนเชื้อเพลิง แกนนอนคือผลผลิตเชิงมวล โดยเส้นประภายในกราฟแสดงถึงค่าผลได้พลังงาน อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิง ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอรชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง คือ 1.182, 1.301 และ 1.412 สำหรับค่าผลผลิตเชิงมวล 61.13%, 53.32% และ 46.31% ตามลำดับ อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดฟิกซ์เบด คือ 1.25, 1.33 และ 1.48 สำหรับค่าผลผลิตเชิงมวล 70%, 60% และ 48% ตามลำดับ อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อพลิงของขี้เลื่อยผ่าการทอรีแฟคชั่น

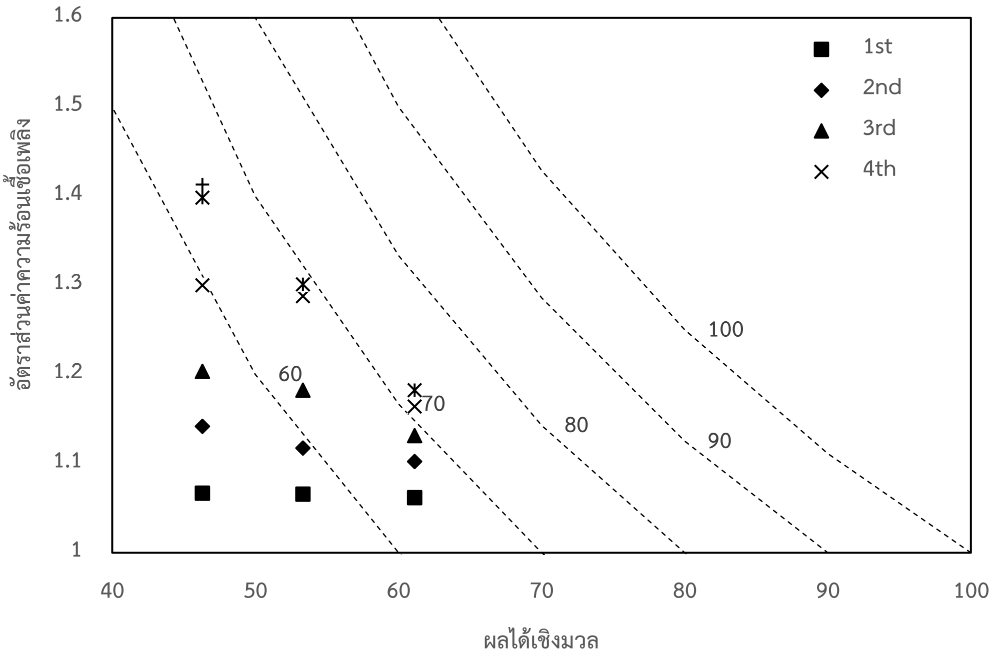
ด้วยเตาปฏิกรณ์ SRSB คือ 1.1141 1.1179และ 1.176 สำหรับค่าผลผลิตเชิงมวล 88.59, 84.71 และ 70% ตามลำดับ อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อพลิงของขี้เลื่อยผ่าการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ DSRSB คือ 1.102, 1.155 และ 1.284 สำหรับค่าผลผลิตเชิงมวล 88.57, 75.25 และ 61% ตามลำดับ อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อพลิงของขี้เลื่อยผ่าการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด คือ 1.146, 1.1684 และ 1.229 สำหรับค่าผลผลิตเชิงมวล 65.41, 62.91 และ 56.41% ตามลำดับ

ความชันของเส้นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิง และการลดลงของผลผลิตมวล ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับในการสลายตัวของชีวมวล [50] จากภาพที่ 59 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการในการสลายตัวของชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ที่ต่างชนิดกัน และแสดงให้เห็นว่าเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแต่ละชนิดมีระดับในการสลายตัวของชีวมวลในกระบวนการแตกต่างกันโดยสังเกตุได้จากความชันของเส้นกราฟของเตาปฏิกรณ์ ค่าความชันของกราฟที่ได้มีผลมาจากคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ดังกล่าว แนวเส้นประแสดงถึงการสลายตัวของชีวมวลในเตาปฏิกรณ์แต่ละชนิด เตาปฏิกรณ์ที่มีความชันสูงที่สุด คือ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดฟิกซ์เบด และตามมาด้วย เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง, เตาปฏิกรณ์ DSRSB, เตาปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด และ เตาปฏิกรณ์ SRSB โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

จากภาพที่ 59 เมื่อเปรียบเทียบระดับการสลายตัวของชีวมวลขี้เลื่อยในเตาปฏิกรณ์ที่แตกต่างกันพบว่า เตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องมีพฤติกรรมการสลายตัวของชีวมวลสูงกว่าเตาปฏิกรณ์ DRSB, ฟลูอิไดซ์เบด และ SRSB จากการสังเกตอัตราส่วนความร้อนเชื้อเพลิง, อัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์และอัตราส่วนความหนาแน่นพลังงานประกอบร่วมด้วยแล้ว พบว่ามีแนวโน้มมาจากพฤติกรรมของเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องที่มีการสลายตัวของชีวมวลสูงส่งผลให้สัดส่วนของไฮโดรเจน ออกซิเจนลดลง และคาร์บอนของเชื้อเพลิงสูงขึ้นจึงมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงขึ้น [4] เมื่อเทียบกับพฤติกรรมการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ที่ทำการสืบค้นข้อมูล

จากภาพที่ 59 พบว่าในที่แนวเส้น iso – energy yield เดียวกัน พิกัดที่ให้ค่าอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงกว่าในขณะที่มีค่าผลได้พลังงานใกล้เคียงกันจะเป็นกรณีที่ดีกว่า หรือ เป็นเตาปฏิกรณ์ที่สามารถดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่นได้ดีกว่า ซึ่งหากเทียบกับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดฟิกซ์เบดแล้ว เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดต่อเนื่องมีระดับในการสลายตัวที่น้อยกว่าเมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่เตาปฏิกรณ์ต้องบรรจุชีวมวลใหม่ทุก 35 นาที จึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตา

มีความแตกต่างกันตามความสูงของเตาปฏิกรณ์ โดยมีค่าผลได้เชิงพลังงานอยู่ในช่วง 65 – 72% เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องมีระดับการสลายตัวที่สูงกว่าเตาปฏิกรณ์ DSRSB, ฟลูอิไดซ์เบด และ เตาปฏิกรณ์ SRSB เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากความชันของกราฟดังแสดงในภาพที่ 59



ภาพที่ 60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความร้อนเชื้อเพลิง - ผลผลิตเชิงมวล และเส้น iso – energy yield ของชีวมวลในลำดับต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

จากภาพที่ 60 ซึ่งแสดงอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลขี้เลื่อยเทียบกับผลได้เชิงมวลพบว่าที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีผลได้เชิงมวล คือ 61.13, 53.32 และ 46.31 ตามลำดับ จากลำดับชีวมวลพบว่าอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับของชีวมวลที่เข้าสู่เตาปฏิกรณ์ การป้อนชีวมวลในลำดับที่ 4 และ 5 ในแต่ละอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นจะมีอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานของเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัว นอกจากในกรณี 450 องศาเซลเซียสที่อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกันในลำดับที่ 5 และ 6 ซึ่งแนวโน้มนี้ได้สอดคล้องกับคุณสมบัติเชื้อเพลิงอื่น ๆ เช่นเดียวกัน ทั้งค่าความร้อนเชื้อเพลิง ค่าความหนาแน่นบัลค์ และค่าความหนาแน่นพลังงาน จากภาพที่ 60 พบว่าอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงเมื่อเริ่มเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวแล้วที่ มีค่าอยู่

ประมาณ 72%, 69% และ 64% สำหรับอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในกรณีที่ค่าผลได้พลังงานมีค่าใกล้เคียงกันนั้น กรณีที่ให้อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงกว่าแสดงให้เห็นว่าเป็นกรณีที่มีสภาวะทอรีแฟคชั่นที่ดีกว่า [49] เพราะฉะนั้นกรณี 400 องศาเซลเซียสจึงเป็นสภาวะที่ดีกว่า 350 องศาเซลเซียส และหากเปรียบเทียบกรณี 400 กับ 450 องศาเซลเซียสแล้ว พบว่า ที่กรณี 450 จะเริ่มเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมคงตัวหลังจากการป้อนชีวมวลลำดับที่ 5 และจากผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์พบว่า ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดภายในเตาปฏิกรณ์ของกรณี 450 องศาเซลเซียส สูงกว่ากรณี 400 องศาเซลเซียส คือ 122.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 42.08% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุด และ 115.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 38.35% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุด ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มของเทคโนโลยีกระบวนการทอรีแฟคชั่น คือ การพยายามลดค่าใช้จ่ายของเทคโนโลยีในขณะที่เพิ่มผลผลิต [42, 56] เพราะฉะนั้นด้วยอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน คือ 1.3 และ 1.4 สำหรับกรณี 400 และ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งในกรณี 400 องสาเซลเซียส ใช้พลังงานในการควบคุมกระบวนการต่ำกว่า มีผลต่างของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ต่ำกว่า และให้ค่าผลได้เชิงพลังงานที่สูงกว่ากรณี 450 องศาเซลเซียส จึงทำให้กรณี 400 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะที่เหมาะที่สุดในการใช้งานเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง ศึกษาการกระจายอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในระหว่างการทำงานของเตาปฏิกรณ์ในแต่ละสภาวะการทดลอง กระบวนการทอรีแฟคชั่นดำเนินโดยการควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อนที่ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส การป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์มีลักษณะการทำงานแบบกึ่งต่อเนื่องใช้ระยะเวลาในแต่ละครั้งทุก 35 นาที ภายในกระบวนการทดลองอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จะถูกบันทึกเพื่อนำไปวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นแล้วจะถูกนำไปทดสอบหาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ซึ่งคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ศึกษาประกอบด้วย ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, ค่าความหนาแน่นบัลค์และค่าความหนาแน่นพลังงาน จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ให้มีลักษณะการทำงานแบบกึ่งต่อเนื่องทำให้เตาปฏิกรณ์มีการสูญเสียความร้อนให้กับชีวมวลใหม่ที่เข้าสู่เตาปฏิกรณ์บริเวณความสูง 0.68 เมตร จึงมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น โดยชีวมวลจะค่อย ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้นตลอดการเคลื่อนที่จากด้านบนสู่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้แหล่งให้ความร้อน เมื่อชีวมวลครบกำหนดเวลาและถูกผลักออกจากเตาปฏิกรณ์ชีวมวลจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังเตาปฏิกรณ์ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงที่สุดและอุณหภูมิต่ำที่สุด คือ 100 องศาเซลเซียส ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับความยาวของเตาปฏิกรณ์คือ 147 องศาเซลเซียส/เมตร

2. อุณหภูมิควบคุมห้องให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ คือ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ คือ 227, 263 และ264 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในช่วงพฤติกรรมคงตัวอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงของขี้เลื่อยที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนชนิดต่อเนื่อง คือ 1.182 - 1.412 โดยจากกราฟเทียบระหว่างค่าความร้อนเชื้อเพลิงและอุณหภูมิพบว่ามีความชัน 0.00697 แสดงให้เห็นว่าระดับของกระบวนการทอรีแฟคชั่นภายในเตาปฏิกรณ์อยู่ในเกณฑ์สูงทั้งในกรณีที่เทียบกับชีวมวลชนิดเดียวกันและชีวมวลต่างชนิด เป็นผลจากเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนมีการเรียงตัวของชีวมวลแบบบัลค์ จึงมีเวลาที่น้ำภายในเตาปฏิกรณ์จะทำปฏิกิริยาในฐานะแคกตาลิสซึ่งมีผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสูงขึ้น

3. ค่าความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีแนวโน้มความหนาแน่นบัลค์มีค่าลดลงตามอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่สูงขึ้น โดยจากกราฟเทียบระหว่างค่าความหนาแน่นบัลค์และอุณหภูมิพบว่ามีความชัน -0.00124 ใกล้เคียงกันกับความชันกราฟของชีวมวลยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นชีวมวลประเภทไม้เช่นเดียวกัน หากพิจารณาที่อัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับชีวมวลก้านถั่วแระและอคาเซียซึ่งเป็นชีวมวลประเภทพืชลำต้นอ่อน แสดงให้เห็นถึงความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนซึ่งมีการสลายตัวสูง จึงมีผลให้ค่าความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลลดลงอย่างมากจนมีค่าใกล้เคียงกับชีวมวลพืชลำต้นอ่อน

4. จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนค่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลขี้เลื่อยหลังผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนอยู่ในเกณฑ์ที่สูงหากเทียบกับการทอรีแฟคชั่นจากเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่น ซึ่งเป็นผลมาจากการการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์สูงเช่นกัน และเนื่องจากค่าอัตราส่วนความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลขี้เลื่อยที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีค่าต่ำ ในขณะที่อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงมีค่าสูง เพราะฉะนั้นการที่อัตราส่วนค่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลขี้เลื่อยอยู่ในเกณฑ์สูงจึงเป็นผลมาจากอิทธิพลของค่าความร้อนเชื้อเพลิง

5. สำหรับกรณี 350 และ 400 องศาเซลเซียส มีค่าผลได้พลังงานใกล้เคียงกัน คือ 69% และ 72% ตามลำดับ ในขณะที่กรณี 400 องศาเซลเซียสมีอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงกว่ากรณี 350 องศาเซลเซียสอยู่ 0.12 ทำให้กรณี 400 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ดีกว่า 350 องศาเซลเซียส สำหรับกรณี 400 กับ 450 องศาเซลเซียสแล้ว ผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ พบว่าผลต่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดภายในเตาปฏิกรณ์ของกรณี 450 องศาเซลเซียส สูงกว่ากรณี 400 องศาเซลเซียส คือ 122.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 42.08% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุด และ 115.23 องศาเซลเซียส คิดเป็น 38.35% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูงสุด ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของกรณี 450 องศาเซลเซียส ด้อยกว่ากรณี 400 องศาเซลเซียส มีอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงใกล้เคียงกัน คือ 1.3 และ 1.4 ซึ่งในกรณี 400 องสาเซลเซียส ใช้พลังงานในการควบคุมกระบวนการต่ำกว่า มีผลต่างของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ต่ำกว่า และให้ค่าผลได้เชิงพลังงานที่สูงกว่ากรณี 450 องศาเซลเซียส 5% จึงทำให้กรณี 400 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะที่เหมาะที่สุดในการใช้งานเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่อง

6. จากผลการทดลองและข้อมูลจากงานวิจัยสืบค้นพบว่าลักษณะเฉพาะของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนมีปฏิกิริยาของกระบวนการภายในเตาปฏิกรณ์รุนแรงของอย่างมาก คือ มีการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลสูงและให้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงด้วยเช่นกัน สังเกตุได้จากค่าความหนาแน่นบัลค์ของชีวมวลหลังผ่านการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมีค่าต่ำในขณะที่อัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง นอกจากนี้กราฟเทียบอัตราส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงร่วมกับผลได้เชิงมวลและ iso – energy yield แสดงถึงความชันของเส้นกราฟที่สูงซึ่งหมายถึงความรุนแรงของการสลายตัวของปฏิกิริยาภายในกระบวนการเพราะฉะนั้นดังที่กล่าวมาข้างต้นข้อดีของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนคือมีความรุนแรงของปฏิกิริยาสูงซึ่งทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงมีพลังงานสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จากการสลายตัวของชีวมวลดังที่กล่าวไว้นี้จึงนำมาซึ่งข้อเสียของเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอน คือ ทำให้มีการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงสูงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ในกรณี 450 องศาเซลเซียสมีการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับกรณี 350 และ 400 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำวิจัยและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยพบว่ามีประเด็นวิจัยที่น่าสนใจ ที่สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในอนาคตเพื่อทำความเข้าใจและพัฒนาการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน ซึ่งมีดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่น่าสนใจ เช่น ความไม่ชอบน้ำ, ความสามารถในการถูกบด ของชีวมวลเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ให้มีความเข้าใจพฤติกรรมของเตาปฏิกรณ์เทอร์โมไซฟอนมากขึ้น

2. เนื่องจากการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนแบบป้อนชีวมวลต่อเนื่องมีความต้องการพัฒนาให้เตาปฏิกรณ์สามารถนำไปใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการนำเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนดำเนินกระบวนการทอรีแฟคชั่นกับชีวมวลประเภทอื่น ๆ หรือ ชีวมวลที่นิยมให้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น ชีวมวลพืชประเภทลำต้นอ่อนประเภทอื่น ชีวมวลพืชประเภทไม้เนื้อแข็ง และ ชีวมวลพืชประเภทไม้เนื้ออ่อน และตรวจสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงของชีวมวลดังกล่าวหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชื้อเพลิงจากผลกระทบของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และระยะเวลากระบวนการทอรีแฟคชั่น และศึกษาลักษณะการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนร่วมกับชีวมวลชนิดอื่น ๆ

3. เนื่องจากชีวมวลที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ด้านอุตสาหกรรมมีหลายขนาด จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาถึงผลกระทบของขนาดอนุภาคชีวมวลทั้งอนุภาคขนาดเล็ก ขนาดเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ (pellet) และ ขนาดเชื้อเพลิงแท่ง (briquette) ต่อคุณสมบัติเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

4. ศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเพื่อทำความเข้าใจลักษณะพฤติกรรมทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ และสามารถเปรียบเทียบกับคุณลักษณะทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นประเภทอื่น ๆ ทำให้ความเข้าใจลักษณะการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนมากขึ้น

5. ศึกษาสมดุลพลังงานของเตาปฏิกรณ์เพื่อทำความเข้าใจถึงการสูญเสียพลังงานของเตาปฏิกรณ์ระหว่างกระบวนการทำงาน และนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้พิจารณาการสูญเสียพลังงานของเตาปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน

6. ศึกษาและสร้างแบบจำลองจลศาสตร์การสลายตัวของชีวมวลขี้เลื่อยทั้งแบบ 1 และ 2 ขั้นตอน ร่วมกับการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องเพื่อให้สามารถทำความเข้าใจกับพฤติกรรมการสลายตัวของชีวมวลระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่น รวมถึงสามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นชีวมวลฟางข้าวด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน ซึ่งรวมถึงการศึกษาจลศาสตร์การสลายตัวของชีวมวลชนิดอื่นร่วมกับการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอน

7. โดยทั่วไปแล้วกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะดำเนินไปภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อย หรือ มีปริมาณออกซิเจนต่ำ แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาผลกระทบของปริมาณออกซิเจนในกระบวนการทอรีแฟคชั่นเนื่องจากผลของการมีออกซิเจนในระบบระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่นนั้น แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ทำให้เชื้อเพลิงลุกไหม้ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่วนอีกกรณีหนึ่งคือจะเกิดกระบวนการไพโรไลซิสทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นสารระเหยและถ่านไพโรไลซิส เพราะฉะนั้นการทดสอบผลกระทบของปริมาณออกซิเจนร่วมกับการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนจึงจัดเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจในการต่อยอดในอนาคต

8. การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนเพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมทางความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์รวมถึงสามารถทำนายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของเตาปฏิกรณ์เพื่อให้สามารถใช้งานเตาปฏิกรณ์ได้โดยใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าที่สุด

9. การทดสอบกระบวนการทอรีแฟคชั่นด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเทอร์โมไซฟอนชนิดป้อนชีวมวลต่อเนื่องร่วมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่ใช้ในกระบวนการโดยปกติมีจะอุณหภูมิประ 200 – 260 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยปรับปรุงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ได้ นอกจากนี้ยังช่วยนำสารระเหยออกจากระบบภายในเตาปฏิกรณ์ในขณะที่ค่าความร้อนเชื้อเพลิงและปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นอีกด้วย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์

ตารางที่ 9 บันทึกอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับเวลากรณีควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 350 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส
0	32.42222
5	33.74444
10	41.03333
15	53.23333
20	67.62222
25	83
30	98.34444
35	111.7889
40	124.9778
45	137.0444
50	149.1778
55	160.3
60	170.3556
65	178.9889
70	186.2667
75	193.7111
80	200.7556

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส
85	207.2889
90	213.5111
95	219.0667
100	223.9556
105	228.6889
110	233.3333
115	236.9778
120	179.0444
125	123.5667
130	110.1111
135	116.8222
140	122.2889
145	129.8222
150	136.5222
155	143.8222
160	151.2333
165	158.5
170	162.6889
175	169.9222
180	177.1444

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส
185	183.9778
190	190.4667
195	196.3778
200	201.5444
205	206.3667
210	170.8889
215	182.9222
220	193.5222
225	202.5111
230	209.8556
235	216.5333
240	223.2556
245	229.5222
250	183.0667
255	198.2111
260	212.2444
265	223.9444
270	234.3444
275	244.8222
280	255.6556

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส
285	264.5667
290	183.0667
295	198.2111
300	212.2444
305	223.9444
310	234.3444
315	244.8222
320	255.6556
325	264.5667

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 10 บันทึกอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับเวลากรณีควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	30.64444
5	32.6
10	39.18889
15	48.28889
20	61.35556
25	78.93333
30	97.05556
35	115.0111
40	130.5222
45	145.6556
50	160.0333
55	170.5778
60	181.1111
65	190.4
70	199.4111
75	207.4222
80	215.8889

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
85	222.0889
90	228.5889
95	234.5667
100	180.9333
105	100.3667
110	111.1222
115	116.4556
120	121
125	126.7444
130	133.5333
135	140.5778
140	148.9889
145	156.7111
150	159.4556
155	168.4556
160	178.0667
165	186.3889
170	196.3333
175	205.6444
180	215.4667

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
185	226.3778
190	215.6444
195	223.4778
200	230.8222
205	238.4889
210	249.7333
215	259.1222
220	268.6111
225	274.5444
230	245
235	253.3778
240	257.3111
245	266.8111
250	272.6889
255	280.3222
260	286.1333
265	290.0444
270	242.5
275	249.6667
280	256.8556

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
285	263.9778
290	271.2889
295	278.1333
300	284.3333
305	291.0667

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 11 บันทึกอุณหภูมิเฉลี่ยเทียบกับเวลากรณีควบคุมอุณหภูมิห้องให้ความร้อน 450 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
0	28.62222
5	30.95556
10	39.34444
15	50.5
20	65.82222
25	82.93333
30	102.1889
35	121.3667
40	134.9
45	148.5889
50	160.9667
55	173.2778
60	184.5
65	194.7889
70	204.0222
75	212.3667
80	220.0889

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
85	227.2111
90	233.5778
95	191.1111
100	113.9
105	99.55556
110	105.1444
115	111.5778
120	126.1889
125	138.3444
130	149.4333
135	162.4889
140	176.8
145	153.9667
150	166.0444
155	179.1889
160	189.9111
165	197.9111
170	205.5778
175	213.8333
180	219.6444

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
185	194.2111
190	203.4111
195	212.5556
200	221.7333
205	231.0556
210	237.7556
215	247.9556
220	257.6667
225	232.2111
230	244.9222
235	253.3
240	258.3556
245	266.7667
250	272.6444
255	280.2889
260	286.1111
265	235.0556
270	242.4667
275	249.4889
280	256.7778

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
285	264.0778
290	271.8667
295	278.8889
300	284.2889
305	234.5444
310	241.9333
315	251.5222
320	256.8
325	264.4667
330	270.8889
335	276.6778
340	284.0778

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิง

ตารางที่ 12 ผลการทดลองค่าความร้อนเชื้อเพลิง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6
350	19.11	19.84	20.36	20.95	21.28	-
400	19.18	20.11	21.28	23.18	23.42	-
450	19.2	20.55	21.66	23.4	25.17	25.43

ตารางที่ 13 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นบัลค์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6
350	165	160	157	153	151	-
400	161	155	153	149	148	-
450	160	157	150	147	144	143

ตารางที่ 14 ผลการทดลองค่าความหนาพลังงาน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6
350	3.154	3.18	3.188	3.199	3.218	-
400	3.091	3.125	3.257	3.462	3.471	-
450	3.078	3.243	3.254	3.437	3.618	3.611

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายการอ้างอิง

1. Basu, P., *Chapter 1 - Introduction*, in *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)*, P. Basu, Editor. 2018, Academic Press. p. 1-27.
2. Demirbas, A., *Biofuels.* 2009: p. 336.
3. Hugo, T.J., *Pyrolysis of sugarcane bagasse*, in *chemical engineering*. 2010, University of Stellenbosch.
4. Medic , D., *Investigation of torrefaction process parameter and characterization of torrefied biomass*. 2012, Iowa state university.
5. Zhang, C., et al., *Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index.* Applied Energy, 2018. **220**: p. 598-604.
6. Basu, P., *Biomass Gasification and Pyrolysis*. 2010: Academic Press.
7. Chansaem Park, U.Z., Sangho Lee, and Chonghun Han *Effect of process operating conditions in the biomass torrefaction.* A simulation study using one-dimensional reactor and process model, 2015. **79**: p. 127-139.
8. Loppinet-Serani, A., Aymonier, C., and Cansell, F, *Current and foreseeable applications of supercritical water for energy and the environment.* 2008(1): p. 486-503.
9. UNFCCC, *Clarifications of definition of biomass and consideration of changes in carbon pools due to a CDM project activity*. 2005.
10. Graham , R.L., *An analysis of potential land base for energy crop in conterminous United state.* Biomass Bioenerg 1994. **6**(3): p. 175-189.
11. Hohenstein W.G., a.W.L.L., *Biomass energy production in the united states: An overview.* Biomass Bioenerg, 1994. **6**(3): p. 161 - 173.
12. R.C, B., *Biorenewable Resource: Engineering New Product from Agriculture*. 2003, Ames, IA: Blackwell
13. Bergman, P.C., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., and Kiel, J. H. A., *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations* Biocoal, 2005.
14. *Biomass feedstock composition and property database*. Available from: http://

www.eere.energy.gov/biomass/progs/search1.cgi.

15. Graham, R.L., *An analysis of the potential land base for energy crops in the conterminous United States.* Biomass and Bioenergy, 1994. **6**(3): p. 175-189.
16. Antal, M.J., and M. Gronli, *The art, science and technology of charcoal production.* 2003. **42**(8): p. 1619-1640.
17. Bell, M.J., and F. Worrall, *Charcoal addition to soil in NE England.* A carbon sink with environmental co-benefit? Sci. Total Environ, 2011. **409**(9): p. 1704-1714.
18. Ciolkosz D., a.W.R., *A review of torrefaction for bioenergy feedstock production.* Biofuels, Bioprod. Biorefin, 2011. **5**: p. 317-329.
19. Mohan D., C.U.P., and P.H. Steele, *Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil.* A critical review, Energy Fuel, 2006: p. 848-889.
20. Neathery, J.K., *Biomass gasification*. In Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemical. 2010, Cambridge,UK: Ed. RSC
21. Basu, P., *Torrefaction Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. 3rd ed. ed. 2013: Academic Press.
22. Arias, B., Pevida,C., Fermoso ,J., and Plaza,M.G, *Influence of the torrefaction on gindability and reactivity of woody biomass. Fuel Process.* Fuel Process. Technol, 2008. **89**: p. 169-175.
23. Prins M.J., P.K.J., and Janssen F.J.J.G, *More efficient biomass gasification via torrefaction.* Energy, 2006. **31**(15): p. 3458-3470.
24. Pimchuai, A., A. Dutta, and P. Basu, *Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties.* Energy & Fuels, 2010. **24**(9): p. 4638-4645.
25. Rousset, P., et al., *Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach.* Fuel Processing Technology, 2011. **92**(10): p. 1890-1897.
26. Di Blasi C., a.L., M, *Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere.* Pyrolysis, 1997: p. 287-303.
27. Couhert C., S.S., and Commandre ,J, *Fuel* Impact of torrefaction on syn-gas production from wood, 2009. **88**: p. 2286–2290.
28. Zanzi R., F.D., Torres A., and Soler P.B, *Bjornbom E. Biomass torrefaction.* In Second World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy,

2004.

29. Repellin , V.G., A., Rolland ,M.,and Guyonnet ,R, *Biomass Bioenerg.* Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln, 2010. **34**: p. 602-609.

30. Mullen, C.A., Boateng, A.A., Goldberg, N.M.,Lima, I.M.,Laird, and D.A.,and Hicks, K.B, *Biomass and Bioenergy.* Bio-oil and biochar production from corn cobs and stover by fast pyrolysis, 2010. **34**(1): p. 67-74.

31. Cui, H.P.a.G., J.R, *Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiflow aspects.* Chemical Engineering Science, 2007. **62**(1): p. 45-55.

32. Henrich, E., *The status of the FZK concept of biomass gasification.* 2007.

33. Li, H., *Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor* Bioresource Technology 2012. **103**(1): p. 453-458.

34. Daniele, B., *Bioresource Technology* Hydrothermal carbonization of off-specification compost: A byproduct of the organic municipal solid waste treatment, 2015. **182**: p. 217 - 224.

35. Bach, Q.-V., *Wet torrefaction of forest residues* Energy Procedia 2014. **61**: p. 1196 – 1199

36. Kambo, H.S., *Applied Energy.* Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization, 2014. **135**: p. 182-191.

37. Mei, Y., *Bioresource Technology* Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas 2015. **177**: p. 355–360

38. Njeng, A.S.B., *Powder Technology.* 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, 2015. **269**: p. 554-565.

39. Wang, M.J., *Energy.* Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues 2012. **37**(1): p. 177-184.

40. *Thermosyphon Technology for Ground Freezing*. 2015; Available from: http://simmakers.com/thermosyphon-technology-ground-freezing.

41. Junsatien, W., *Fixed bed torrefaction reactor with thermal management system by using thermosyphon*, in *mechanical engineering*. 2013, Silpakorn University

42. B. Batidzirai , A.P.R.M., W.B. schakel, H.M. Junginger, A.P.C. Faaij, *Biomass torrefaction technology.* Energy, 2013(10 October 2013): p. 62.
43. R.W. Nachenius, T.A.v.d.W., F.Ronsse, W.Prins, *Torrefaction of pine in a bench-scale screw conveyor reactor.* 2015(23 April 2015): p. 104.
44. Fabio Codignole Luz, S.C., Alessandro Manni, Vincenzo Mulone, Vittorio Rocco, *Biomass fast pyrolysis in a shaftless screw reactor A 1-D numerical model.* 2018(29 May 2018): p. 805.
45. Ziliang Wang, C.J.L., John R.Grace,Hui Li,Maria Regina Parise, *Effects of temperature and particle size on biomass torrefaction in a slot rectangular spouted bed reactor.* 2018(18 July 2017): p. 8.
46. Xingping Kai, Y.M., Tianhua Yang, Bingshuo Li, Wanli Xing, *Effect of torrefaction on rice straw physicochemical characteristics and particulate matter emission behavior during combustion.* 2019(9 January 2019): p. 8.
47. M, G.-P.M., A,Chaala, and C, Roy, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2002. **65**: p. 111.
48. Jinje Park, Y.L., Changkook Ryu, Young-Kwon Park, *Slow pyrolysis of rice straw Analysis of products properties, carbon and energy yields.* 2014(27 December 2013): p. 155.
49. Ziliang Wang, C.J.L., John R.Grace, *Biomass torrefaction in a slot-rectangular spouted bed reactor.* 2018(6 February 2018): p. 9.
50. Soponpongpipat, N., S. Nanetoe, and P. Comsawang, *Thermal Degradation of Cassava Rhizome in Thermosyphon-Fixed Bed Torrefaction Reactor.* Processes, 2020. **8**(3).
51. Wang, Z., C.J. Lim, and J.R. Grace, *A comprehensive study of sawdust torrefaction in a dual-compartment slot-rectangular spouted bed reactor.* Energy, 2019. **189**: p. 116306.
52. Singh, R.k., A. Sarkar, and J.P. Chakraborty, *Effect of torrefaction on the physicochemical properties of pigeon pea stalk (Cajanus cajan) and estimation of kinetic parameters.* Renewable Energy, 2019. **138**: p. 805-819.
53. Cardona, S., et al., *Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions.*

Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019. **31**: p. 17-24.

54. Singh, S., J.P. Chakraborty, and M.K. Mondal, *Torrefaction of woody biomass (Acacia nilotica): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel.* Renewable Energy, 2020. **153**: p. 711-724.

55. Mok, W.S.L., et al., *Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 1992. **31**(4): p. 1162-1166.

56. Dhungana, A., P. Basu, and A. Dutta, *Effects of Reactor Design on the Torrefaction of Biomass.* Journal of Energy Resources Technology, 2012. **134**(4).

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สรรพสิทธิ์ ชลพันธ์
วัน เดือน ปี เกิด	8 มิถุนายน 2526
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล Master degree of mechanical engineering
ที่อยู่ปัจจุบัน	562/52 อินซิโอคอนโด ถ.เสรีไทย แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม กทม. 10240
ผลงานตีพิมพ์	การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวในเตาวัสดุพรุนที่มีการหมุนวนก๊าซไอเสีย

มหาวิทยาลัยศิลปากร