



เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิวชั่นเบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ทอกลักความร้อน

สำนักหอสมุดกลาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

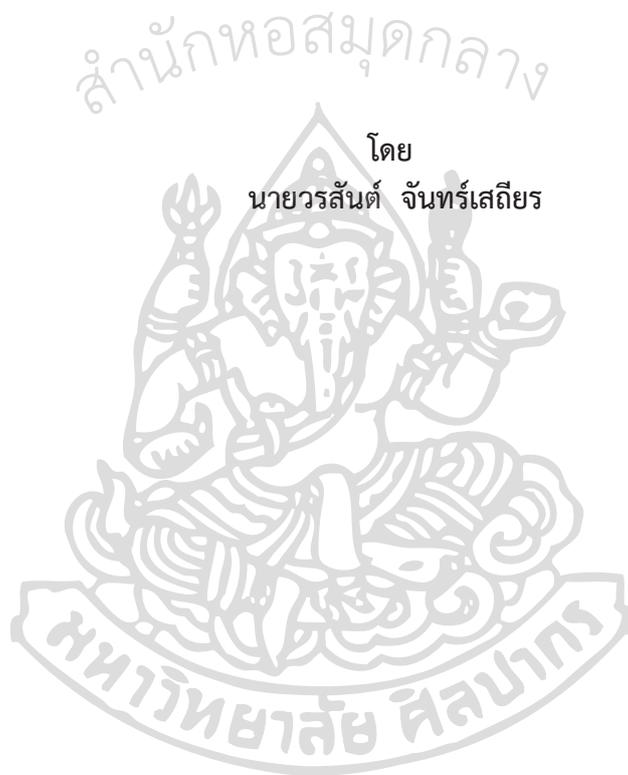
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิวชั่นเบตพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่อน้ำความร้อน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2556

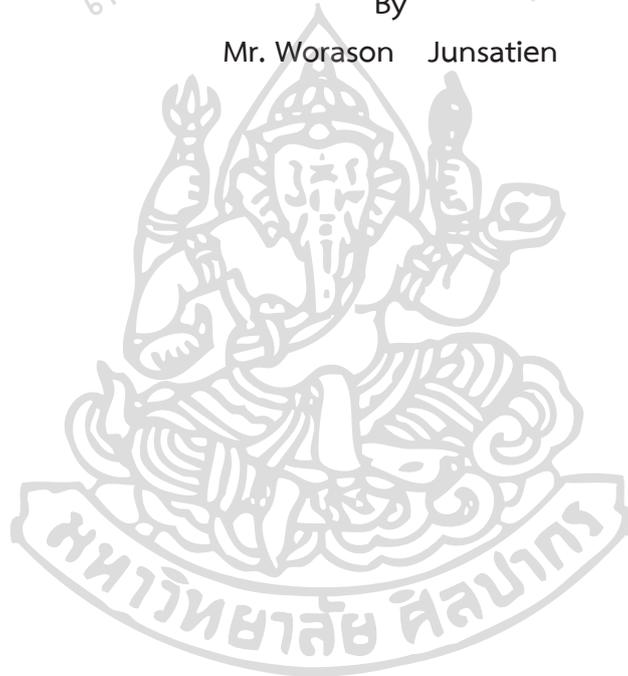
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

FIXED BED TORREFACTION REACTOR WITH THERMAL MANAGEMENT SYSTEM
BY USING THERMOSYPHON

สำนักหอสมุดกลาง

By

Mr. Worason Junsatien



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
Master of Engineering Program in Energy Engineering
Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2013
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง“เตาปฏิกรณ์ทอรี
แฟลคซ์แบบฟลักซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่ออวกาศความร้อน” เสนอโดย นายวรสันต์
จันทร์เสถียร ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมพลังงาน

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทสพล เขตเจนการ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุตาการ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์)

...../...../.....

54406215: สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คำสำคัญ: ทอรีแฟคชั่น / ชีวมวล / เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลักซ์เบด / ท่อกลักความร้อน / ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น / ค่าความร้อน / ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบ

วรสันต์ จันทร์เสถียร: เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลักซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่อกลักความร้อน. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผศ.ดร. นิตินงค์ โสภณพงศ์พิพัฒน์. 168หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลักซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่อกลักความร้อนเพื่อศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น ท่อกลักความร้อนในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นจำนวน 5 ท่อ แต่ละท่อจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.5 เซนติเมตร และมีส่วนทำระเหย 50 เซนติเมตร ส่วนควบแน่น 60 เซนติเมตร สารทำงานที่ใช้คือ DOWNTHERM A โดยอัตราการเติมสาร 50% ทำทดสอบเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่สร้างขึ้นกับชีวมวลจำนวน 5 ชนิด คือ ฟางข้าว, เหม้ามันสำปะหลัง, ใบและยอดอ้อย, ชังข้าวโพด และทางปาล์มน้ำมัน กำหนดอุณหภูมิทอรีไฟร์ 230, 250, 280 องศาเซลเซียส และเวลาทอรีไฟร์ 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษาคือ กรณีศึกษาที่ 1 การใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงและกรณีศึกษาที่ 2 การใช้ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ลักษณะของชีวมวลที่ผ่านการการทอรีไฟร์ ผลได้เชิงมวล ค่าความร้อน และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น จากการวิจัยพบว่า ผลได้เชิงมวล ค่าความร้อน และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่าอยู่ในช่วง 17.80 - 26.03 MJ/kg, 0.61 - 0.94 และ 0.899- 1.167 ตามลำดับ และเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับฟางข้าวคือ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียสด้วยเวลา 1.5 ชั่วโมง, เหม้ามันสำปะหลังคือ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลา 2 ชั่วโมง, ใบและยอดอ้อยคือ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียสด้วยเวลา 2 ชั่วโมง, ชังข้าวโพดคือ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลา 2 ชั่วโมง และทางปาล์มน้ำมันคือ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลา 1.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งในกรณีการใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงและกรณีการใช้ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา2556

54406215: MAJOR: ENERGY ENGINEERING

KEY WORD: TORREFACTION / BIOMASS / FIXED BED TORREFACTION REACTOR /
THERMOSYPHON / TORREFACTION EFFICIENCY / HEATING VALUE /
BIOMASS WOOD PELLET

WORASON JUNSATIEN: FIXED BED TORREFACTION REACTOR WITH
THERMAL MANAGEMENT SYSTEM BY USING THERMOSYPHON. THESIS ADVISOR:
ASST. PROF. NITIPONG SOPONPONGPIPAT, Ph.D. 168 pp.

This research establishes the fixed bed torrefaction reactor with two-phase closed thermosyphon as thermal distribution device to study the properties of torrefied product. Five of two-phase closed thermosyphon were installed inside the reactor. Two-phase closed thermosyphon were made of mild steel pipes with 6 cm in the outside diameter (OD), 2.5 mm in thickness, and 110 cm in length. The evaporator section was 50 cm and condenser section was 60 cm. DOWTHERM – A was used as working fluid. The filling ratio was 50% of the evaporator volume. Five types of which were rice straw, cassava rhizome, sugarcane leaves, corncob, and oil palm fronds were used in this experiment. The two operating parameters, torrefaction temperature and residence time for the process were varied at 230, 250, 280 °C and 1, 1.5, 2 hours, respectively. The testing for torrefaction reactor can be divided into 2 case studies; using liquefied petroleum gas and biomass wood pellet as fuel. The temperature profile, appearance, mass yield, heating value and torrefaction efficiency of torrefied samples were presented. The research result found that, the mass yield, HHV, and torrefaction efficiency of torrefied biomass were ranged from 17.28 - 28.83 MJ/kg, 0.43 – 0.94 and 0.761- 1.350, respectively. The optimum conditions were evaluated at different torrefaction temperatures and residence time through both using liquefied petroleum gas and biomass wood pellet as fuel which were as follows: 250 °C, 1.5 hrs for rice straw, 280 °C, 2 hrs for cassava rhizome, 250 °C, 2 hrs for sugarcane leaves, 280 °C, 2 hrs for corncob, and 280 °C, 1.5 hrs for oil palm fronds, respectively.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2013

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลักซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ทอกลักความร้อน ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) โครงการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดทอรีไฟร์ (Torrefied Biomass) สำหรับชุมชน เพื่อการทดแทนการใช้ถ่านหิน และก๊าซปิโตรเลียมชนิดเหลว (LPG) จึงทำให้เกิดโครงการวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องในหน่วยงานดังกล่าวทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ประสานงานในทุก ๆ ด้านจนกระทั่งการศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลงด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. นิตติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ กรุณาให้โอกาส ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ ช่วยเหลือ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ทศพล เขตเจนการ ประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ และ ผศ.ดร. อธิระศักดิ์ หุตากร กรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ รวมทั้งผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความเรียบร้อยและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ณัฐ อธิษะพงษ์และ อ.ณัฐวุฒิ ธาราวดี ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการผลิตทอกลักความร้อน ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรม เชื้อเพลิงและพลังงาน และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร และคุณทั้ง ถิ่นน้อยวงษ์ ที่สนับสนุน ช่วยเหลือคอยดูแลให้คำแนะนำในการทำออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้ และบุคคลที่เกี่ยวข้องทุก ๆ ท่านที่ให้การช่วยเหลือสนับสนุนและเป็นกำลังใจ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจนเป็นผลงานวิจัยที่มีคุณค่าและมีประสิทธิภาพในการนำเสนอผลงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศได้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณพ่อและแม่ รวมถึงทุกคนในครอบครัวจันทร์เสถียรที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเสร็จสิ้นลงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
สมมติฐานของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ขั้นตอนของการวิจัย.....	4
ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.....	5
ความจำกัดของการวิจัย.....	5
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
ชีวมวล.....	7
เทคโนโลยีการปรับปรุงชีวมวลทางเคมีความร้อน.....	8
กัลกความร้อน.....	14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
เครื่องมือสำหรับงานวิจัย.....	28
สถานที่ทำการวิจัย.....	32
ระยะเวลาการวิจัย.....	32
งบประมาณการวิจัย.....	33
การวางแผนการวิจัย.....	33
วิธีการทดลอง.....	38
วิธีการวิเคราะห์ผล.....	40
4 ผลและวิเคราะห์ผลงานวิจัย.....	45
ผลและการวิเคราะห์ผล: กรณีศึกษาที่ 1 การใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง.....	45
สำหรับเห้งน้ำมันสำปะหลัง.....	45

บทที่	หน้า
สำหรับใบและยอดอ้อย.....	54
สำหรับฟางข้าว.....	62
สำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	69
สำหรับซังข้าวโพด.....	77
ผลและการวิเคราะห์ผล:กรณีศึกษาที่2การใช้ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง	85
สำหรับเหง้ำมันสำปะหลัง.....	85
สำหรับใบและยอดอ้อย.....	91
สำหรับฟางข้าว.....	96
สำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	102
สำหรับซังข้าวโพด.....	107
5 สรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	113
สรุปงานวิจัย.....	113
ข้อเสนอแนะงานวิจัย.....	114
รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	119
ภาคผนวก ก รายการแบบก่อสร้างเตาปฏิกรณ์ทอร์แพคชั้นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบ	
จัดการความร้อนโดยใช้ท่อถักความร้อน.....	120
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลองงานวิจัย.....	138
ประวัติผู้วิจัย.....	168

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552.....	1
2.1	ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล.....	10
2.2	การแบ่งประเภทของวิธีแก๊สซิฟิเคชั่น.....	13
3.1	ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย.....	32
3.2	จำนวนการทดลอง.....	37
ภาคผนวก		
ก.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอร์แฟคชั่น.....	140
ก - 1.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับเห้งน้ำมันสำปะหลัง.....	140
ก - 2.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับใบและยอดอ้อย.....	142
ก - 3.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับชังข้าวโพด.....	144
ก - 4.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	146
ก - 5.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับฟางข้าว.....	148
ข.	ผลได้เชิงมวล.....	150
ค.	ค่าความร้อน.....	152
ง.	ประสิทธิภาพทอร์แฟคชั่น กรณีพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทอร์แฟคชั่น.....	154
จ.	ประสิทธิภาพทอร์แฟคชั่น กรณีพลังงานที่ใช้ในเดินเตาปฏิกรณ์ทอร์แฟคชั่น.....	156
ฉ.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอร์แฟคชั่น.....	159
ฉ - 1.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับเห้งน้ำมันสำปะหลัง.....	159
ฉ - 2.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับใบและยอดอ้อย.....	160
ฉ - 3.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับชังข้าวโพด.....	161
ฉ - 4.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	162
ฉ - 5.	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับฟางข้าว.....	163
ช.	ผลได้เชิงมวล.....	164
ซ.	ค่าความร้อน.....	165
ณ.	ประสิทธิภาพทอร์แฟคชั่น กรณีพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทอร์แฟคชั่น.....	166
ญ.	ประสิทธิภาพทอร์แฟคชั่น กรณีพลังงานที่ใช้ในเดินเตาปฏิกรณ์ทอร์แฟคชั่น.....	167

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	กระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล.....	11
2.2	โครงสร้างและส่วนประกอบของกัลักความร้อน.....	15
2.3	กัลักความร้อนก่อนวางในแหล่งความร้อน.....	16
2.4	ความแตกต่างของความดันและอุณหภูมิของกัลักความร้อน.....	16
2.5	กัลักความร้อนขณะวางในแหล่งให้ความร้อน.....	17
2.6	การถ่ายเทความร้อนภายในกัลักความร้อน.....	18
2.7	ขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	19
2.8	การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อน....	20
2.9	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด.....	21
2.10	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ.....	21
2.11	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	22
2.12	แผนภาพกระบวนการของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด.....	23
2.13	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดของศูนย์วิจัยพลังงานของประเทศเนเธอร์แลนด์	23
2.14	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารีคลิน.....	24
2.15	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรู.....	24
2.16	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมัลติเฟลเฮิร์ท.....	25
2.17	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบทอร์เบด.....	26
2.18	เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารีดรัม.....	27
3.1	เครื่องสับหยาบ.....	28
3.2	เครื่องบดละเอียด.....	29
3.3	เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.4	หลักการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับห้องปฏิบัติการ.....	30
3.5	แก๊สหุงต้ม.....	30
3.6	เตาแก๊สซีไฟเออร์รูปแบบโดนัท.....	31
3.7	ชีวมวล(ฟางข้าว)อัดแท่งอัดแท่งตะเกียบ.....	31
3.8	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	31
3.9	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล.....	32
3.10	แผนการดำเนินงานการทดลองกรณีศึกษาที่ 1.....	34
3.11	แผนการดำเนินงานการทดลองกรณีศึกษาที่ 2.....	34
3.12	แผนการทดลองกรณีศึกษาที่ 1.....	35
3.13	แผนการทดลองกรณีศึกษาที่ 2.....	36

รูปที่	หน้า	
3.14	ขั้นตอนการทดลอง.....	39
3.15	การสมมูลมวล.....	40
3.16	การสมมูลพลังงาน.....	41
4.1	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส.....	46
4.2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส.....	46
4.3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส.....	47
4.4	ลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ.....	48
4.5	ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง.	50
4.6	ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง.	51
4.7	ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง.....	53
4.8	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส.....	54
4.9	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส.....	55
4.10	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส.....	55
4.11	ลักษณะของใบและยอดอ้อยเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ.....	56
4.12	ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับใบและยอดอ้อย.....	58
4.13	ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับใบและยอดอ้อย.....	59
4.14	ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับใบและยอดอ้อย.....	61
4.15	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส.....	62
4.16	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส.....	63
4.17	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส.....	63
4.18	ลักษณะของฟางข้าวเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ.....	64
4.19	ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับฟางข้าว.....	66
4.20	ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับฟางข้าว.....	67

รูปที่	หน้า
4.21 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชั่นสำหรับฟางข้าว.....	68
4.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส.....	70
4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส.....	70
4.24 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส.....	71
4.25 ลักษณะของทางปาล์มน้ำมันเมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ.....	72
4.26 ผลของเวลาในกระบวนการทอริแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	74
4.27 ผลของเวลาในกระบวนการทอริแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	75
4.28 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชั่นสำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	77
4.29 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส.....	78
4.30 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส.....	78
4.31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส.....	79
4.32 ลักษณะของซังข้าวโพดเมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ.....	80
4.33 ผลของเวลาในกระบวนการทอริแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับซังข้าวโพด.....	82
4.34 ผลของเวลาในกระบวนการทอริแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพด.....	83
4.35 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชั่นสำหรับซังข้าวโพด.....	84
4.36 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่นต่างๆ ที่เวลาในการทอริแฟคชั่น 120 นาที.....	86
4.37 ลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่นต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง.....	87
4.38 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอริแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับเหง้ามัน - สำปะหลัง.....	88
4.39 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอริแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับเหง้ามัน - สำปะหลัง.....	89
4.40 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชั่นสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง.....	90
4.41 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่นต่างๆ ที่เวลาในการทอริแฟคชั่น 120 นาที.....	91
4.42 ลักษณะของใบและยอดอ้อยที่อุณหภูมิทอริแฟคชั่นต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง.....	92

รูปที่	หน้า
4.43 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับไบและยอต - อ้อย.....	93
4.44 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับไบและยอตอ้อย	94
4.45 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับไบและยอตอ้อย.....	96
4.46 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆ ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 120 นาที.....	97
4.47 ลักษณะของฟางข้าวที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง.....	98
4.48 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับฟางข้าว.....	99
4.49 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับฟางข้าว.....	100
4.50 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าว.....	101
4.51 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆ ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 120 นาที.....	102
4.52 ลักษณะของทางปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง.....	103
4.53 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	104
4.54 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	105
4.55 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับทางปาล์มน้ำมัน.....	106
4.56 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆ ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 120 นาที.....	108
4.57 ลักษณะของซังข้าวโพดที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง.....	109
4.58 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับซังข้าวโพด.....	110
4.59 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพด.....	111
4.60 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชีวมวล เป็นผลผลิตที่เหลือจากภาคการเกษตรหลังจากที่นำส่วนที่เป็นประโยชน์ส่งขายในเชิงพาณิชย์แล้ว ซึ่งจะถูกทิ้งให้เป็นเศษวัสดุเพื่อใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ภายในพื้นที่การเพาะปลูกหรือบางครั้งเกษตรกรกำจัดโดยการเผาทำลาย ซึ่งอาจทำให้เกิดเป็นมลพิษกับสิ่งแวดล้อม ในอุตสาหกรรมใช้ชีวมวลที่เหลือใช้เช่น กากอ้อย ชังข้าวโพด แกลบและใยจากปาล์มน้ำมันมาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อต้มน้ำ เพื่อนำไอน้ำมาผลิตกระแสไฟฟ้าและลดการใช้พลังงานจากน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติ ในภาคเกษตรกรรมใช้ฝางกลบเป็นปุ๋ย ให้กับพื้นดิน หรือเผาทิ้งเป็นต้น จากการใช้งานดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการใช้ชีวมวลที่ไม่คุ้มค่า ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทำให้ยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศหรือการใช้แก๊สธรรมชาติเช่นเดิม ชีวมวลที่น่าจะมีศักยภาพในการเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ ได้แก่ อ้อย ข้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน ถั่วเหลือง มะพร้าว และไม้ยูคาลิปตัส และยางพารา ซึ่งพืชทั้ง 8 ชนิดนี้เป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศที่มีพื้นที่ ในการเพาะปลูกมากและกระจายไปยังพื้นที่ต่างๆทั่วประเทศ

ตารางที่ 1.1 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552 [1]

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้(ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ใบและยอด	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ชัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11

ตารางที่ 1.1 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552 (ต่อ) [1]

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้(ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะลายเปล่า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใย	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
	8,162,379	กะลา	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มันสำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628990.82	15.40	9686.46	229.30
		กาบ	464250.95	16.23	7534.79	178.36
		กะลา	128936.58	17.93	2311.83	54.73
ไม้ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	145,853,073	-	59,539,905.20	-	504,339.40	11,938.67

การใช้งานโดยส่วนใหญ่เป็นการนำชีวมวลมาเผาโดยตรงเพื่อให้ความร้อน หรือ กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo chemical conversion) ซึ่งเป็นกระบวนการการเปลี่ยนแปลงสถานะให้เป็นแก๊ส (Gasification) โดยกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และนำแก๊สที่ได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการเผาโดยตรงนั้นจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากเนื่องจากการเผาไหม้จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และฝุ่นละอองฟุ้งในอากาศ (กรณีที่ไม่มีการจัดการที่ดี) และในระบบแก๊สซิฟิเคชันนั้น ทำให้เราสูญเสียส่วนที่เป็นของแข็งที่กลายเป็นขี้เถ้าโดยไร้ประโยชน์

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลที่นิยมทำกันอย่างแพร่หลายคือ การนำชีวมวลเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้สารเฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose) ทั้งหมดสลายตัว และเซลลูโลส (Cellulose) จำนวนหนึ่งสลายตัวไป และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้คือ ถ่าน(Charcoal) แม้ว่ากระบวนการนี้จะทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อนสูงขึ้น แต่กระบวนการนี้จะทำให้มวลของชีวมวลสด

สูญหายไปมาก และยังทำให้พลังงานในตัวชีวมวลสูญเสียไปในกระบวนการอย่างมาก ได้มีการแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสที่มีอุณหภูมิสูงมากถึง 300 องศาเซลเซียส จะทำให้พลังงานในตัวชีวมวลลดลงถึง 16% เมื่อเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสที่มีอุณหภูมิเพียง 220 องศาเซลเซียส ดังนั้น การควบคุมกระบวนการไพโรไลซิสให้อยู่ในระดับอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการสลายตัวเฉพาะสารเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีลิกนิน (Lignin) อยู่ระหว่างเส้นใยของสารเฮมิเซลลูโลส ในขณะที่สารเซลลูโลสส่วนใหญ่ยังคงอยู่ ลักษณะเช่นนี้ทำให้ลิกนินในชีวมวลกลายเป็นพลาสติกธรรมชาติ ทำให้ชีวมวลมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการเก็บรักษาชีวมวลจึงทำได้ง่าย และชีวมวลลักษณะนี้จะไม่ผุกร่อนและเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพอีกด้วย นอกจากนี้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่ควบคุมระดับอุณหภูมิและเวลาอย่างเหมาะสมนี้ จะมีค่าความร้อนสูงขึ้นและยังคงเก็บรักษาพลังงานไว้ในตัวชีวมวลได้มากเมื่อเทียบกับกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน กระบวนการไพโรไลซิสที่ควบคุมระดับอุณหภูมิ และเวลาอย่างเหมาะสมนี้ เรียกว่ากระบวนการทอริแฟคชัน (Torrefaction process) [2, 3, 4, 5]

กระบวนการทอริแฟคชัน คือ กระบวนการปรับปรุงชีวมวลด้วยความร้อนทางเคมี ซึ่งจะแตกต่างจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่มีอุณหภูมิการดำเนินการอยู่ที่ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อย ไม่มีออกซิเจนและอัตราความร้อนต่ำ กระบวนการทอริแฟคชันนี้ เป็นการปรับปรุงชีวมวล ที่เพิ่มค่าความหนาแน่นของพลังงาน ลดอัตราค่าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ความไม่ชอบน้ำ อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และการเก็บชีวมวลในปริมาณที่มากขึ้นด้วย นอกจากนี้กระบวนการทอริแฟคชันยังมีการการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกระบวนการปรับปรุงชีวมวลอื่นๆ (กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน , กระบวนการไพโรไลซิส , กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน) การสมดุลมวลและพลังงานสำหรับกระบวนการทอริแฟคชันแล้ว จะพบว่าชีวมวลที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง 70% และมวลที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซ 30% ส่วนสัดส่วนของพลังงานจะเหลือ 90% จากการทอริแฟคชันซึ่งมีพลังงานเพียง 10% [6, 7, 8] ที่สูญเสียไปซึ่งเป็นข้อดีของกระบวนการทอริแฟคชันที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่ง การนำเทคโนโลยีทอริแฟคชันมาใช้จะเกิดผลดีอย่างมากในการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพความหนาแน่นของพลังงานที่อยู่ในตัวชีวมวล ความชื้นต่ำทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บ ลดการสูญเสียของชีวมวลในระหว่างที่ทำการขนส่งและที่สำคัญคือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการนำเข้าน้ำมันดิบ และการใช้แก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่งในการพัฒนาเป็นพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนให้กับประเทศไทยได้อย่างมั่นคง

สำหรับการพัฒนาเตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชัน รูปแบบเตาส่วนใหญ่จะเป็นแบบการเคลื่อนตัวและมีกลไกการสร้างและหลักการทำงานที่ยุ่งยาก ซึ่งไม่เหมาะแก่การประยุกต์ใช้งานขนาดเล็กในเขตชุมชนทั่วไป ดังนั้นทางเลือกที่เหมาะสมในการใช้งานของเตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชันสำหรับชุมชนคือเตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชันแบบฟิกซ์เบด แต่ปัญหาที่พบเจอในเตาชนิดนี้คือ การกระจายตัวของความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอและทั่วถึงห้องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดกระบวนการทอริแฟคชันที่ไม่ทั่วถึงและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ [9, 10] อย่างไรก็ตามปัญหาการกระจายตัวทางความร้อนในเตาปฏิกรณ์ฟิกซ์เบด สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ท่ออากาศความร้อนมาประยุกต์ใช้กับเตาชนิดนี้ [11] ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ในงานวิจัยหลายรูปแบบ แต่ยังไม่

ไม่มีการนำท่ออาก้าความร้อนมาประยุกต์ใช้ในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะ ออกแบบและสร้างเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟลักซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่ออาก้าความร้อน อีกทั้งแสดงค่าความร้อนผลได้ของมวล และประสิทธิภาพของทอรีแฟคชั่นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟลักซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อน โดยใช้ท่ออาก้าความร้อนขนาด 2 กิโลกรัมต่อครั้ง (อ้างอิงจากความหนาแน่นของไบอ้อย)

1.2.2 เพื่อศึกษาค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

1.2.3 เพื่อศึกษาการสมดุลมวลและพลังงานของเตาทอรีแฟคชั่นที่สร้างขึ้น

1.2.4 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของเตาทอรีแฟคชั่นที่สร้างขึ้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- สามารถใช้ท่ออาก้าความร้อนช่วยกระจายอุณหภูมิได้ทั่วและสม่ำเสมอด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นทั้ง 4 จุด

- อุณหภูมิและเวลาในการการทอรีแฟคชั่นจะส่งผลต่อค่าความร้อน ผลได้ของมวล และ ประสิทธิภาพของทอรีแฟคชั่น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ชีวมวลตัวอย่างที่นำมาทำการทดลอง คือ ทางปาล์มน้ำมัน ฟางข้าว ชังข้าวโพด เหง้ามัน และ ไบอ้อย

1.4.2 กำหนดให้ชีวมวลแต่ละชนิด มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 10-20 ร้อยละความชื้น มาตรฐานเปียก (%w.b)

1.4.3 ทำการทดลองที่เวลาการทอรีแฟคชั่น 3 เวลา คือ 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ

1.4.4 ทำการทดลองที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 3 ระดับ คือ อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ

1.4.5 ใช้ก๊าซหุงต้มและชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน

1.4.6 ใช้เวลาในการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นเป็น เวลา 0.5 ชั่วโมง

1.4.7 ท่ออาก้าความร้อนที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นมีจำนวนทั้งหมด 5 ท่อ แต่ละท่อจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.5 เซนติเมตร ซึ่งจะแบ่ง ส่วนทำระเหย 50 เซนติเมตร ส่วน ควบแน่น 60 เซนติเมตร พร้อมสารทำงานที่บรรจุคือ DOWNTHERM A โดยอัตราการเติมสาร 50%

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษากระบวนการ หลักการทำงานเตาทอรีแฟคชั่นที่มีการใช้ งานในอุตสาหกรรม

1.5.2 ดำเนินการออกแบบและจัดสร้างเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ทอกลักความร้อน

1.5.3 ทำการดำเนินการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยใช้ก๊าซหุงต้มและชีวมวลสดเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน

1.5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่น เมื่อใช้ก๊าซหุงต้มและชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน

1.5.5 สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่น เมื่อใช้ก๊าซหุงต้มและชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน พร้อมเขียนรายงานสรุปการวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.6.1 เตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ทอกลักความร้อนร้อนถูกสร้างขึ้นตามแบบที่ได้ออกแบบไว้

1.6.2 การทดลองทอรีแฟคชั่นจะดำเนินการภายในเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ทอกลักความร้อน โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

1.6.3 การทดลองหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่น คือ อุณหภูมิช่วงเวลาการทอรีแฟคชั่น จะทำการทดลองตามเงื่อนไขในขอบเขตของการทดลองเท่านั้น

1.7 ความจำกัดของการวิจัย

เตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ทอกลักความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการสร้างขึ้นเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการปรับปรุงชีวมวลทางด้านความร้อนเท่านั้น อาจจะไม่เป็นเทคโนโลยีที่ดีในเทคโนโลยีดังกล่าว

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 ทอรีแฟคชั่น (Torrefaction) คือ การปรับปรุงชีวมวลด้วยความร้อนทางเคมี ที่มีอุณหภูมิการดำเนินการอยู่ที่ 200 - 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อย ไม่มีออกซิเจนและอัตราความร้อนต่ำ

1.8.2 ชีวมวล (Biomass) คือ วัสดุหรือสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ชีวมวลนี้รวมถึงวัสดุทั้งทางการเกษตร เศษไม้ ปลายไม้จากอุตสาหกรรมไม้ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร และของเสียจากชุมชนหรือจากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเกษตร

1.8.3 เตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด (Fixed bed reactor) คือ เตาศรีภัณฑ์ที่มีตะแกรงหรือชั้นวางชีวมวลอยู่หนึ่ง โดยมีการให้ความร้อนอยู่ทางด้านล่างของเตา

1.8.4 ท่อกัลป์ความร้อน (Two-phase closed thermosyphon) คือ ท่อความร้อนชนิดหนึ่งที่อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นตัวช่วยในการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อ

1.8.5 ค่าความร้อน (Heating value) คือ พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงหนัก 1 กรัม มีหน่วยเป็นแคลอรีต่อกรัม หรือ เมกะจูลต่อกิโลกรัม



บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุหรือสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ ชีวมวลนับรวมถึงวัสดุทั้งทางการเกษตร เศษไม้ ปลายไม้จากอุตสาหกรรมไม้ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร และของเสียจากชุมชนหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร [12] สำหรับองค์ประกอบทั่วไปของชีวมวล [13] สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

ก. เซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ที่ดิกูโคสถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิกซึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ คือดีกรีของโพลิเมอร์ไรเซชันซึ่งมีความกว้างตั้งแต่หลายพันจนถึงหลายหมื่น จำนวนผลลัพธ์ของการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสคือ ดิกูโคส(โมโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลลัพธ์เป็นไดแซคคาไรด์ (เซลลูไบโอส) และโพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีลำดับ $n = 3$ ถึง 10 เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึกและต้านทานต่อกรดและด่าง

ข. เฮมิเซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีจำนวนยูนิตคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีไซโลส และดีอะราไบโนส และคาร์บอนเท่ากับ 6 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส ดีกาแลคโตสและดีกลูโคส โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 5 มีจำนวนมากกว่า โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 6 สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยคือ $(C_5H_8O_4)_n$ เนื่องจากดีกรีโพลิเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50-200 โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลสเป็นจำนวนมากสามารถละลายได้ในสารละลายเบส เฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือไซแลน ซึ่งประกอบด้วยไซโลสด้วยพันธะ 1, 4

ค. ลิกนิน

สารประกอบที่ประกอบด้วย ยูนิตฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ ซึ่งเชื่อมกันเป็นสามมิติ โครงสร้างนั้นซับซ้อนและยังไม่มี การเข้าใจอย่างแท้จริง โครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลหริยและสารเคมี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันร่วมด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินถูกพบอย่างสากลในสารชีวมวลชนิดต่างๆ และแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก

ง. แป้ง

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

จ. โปรตีน

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับ

ของโพลีเมอร์ไรเซชัน โพรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่าสามสารข้างต้นที่กล่าวมา

ฉ. สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์อื่นๆมีได้หลากหลายขึ้นกับชนิด สารอินทรีย์ที่มีจำนวนมากได้แก่ กลีเซอรอล(ตัวอย่าง เช่น น้ำมันผักกาดก้านขาว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ) และซูโครสในอ้อย

ชีวมวลไม่กี่ชนิดที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้โดยตรงตามลักษณะสภาพเดิมเพื่อให้ได้พลังงานออกมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น ไม้ฟืน ในขณะที่ชีวมวลส่วนใหญ่อาจจำเป็นต้องแปลงสภาพก่อนนำไปใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล[14] ชีวมวลจะมีลักษณะที่ด้อยกว่าดังนี้

1. ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่า
2. ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูงเป็นอุปสรรคในการเก็บรักษา ส่งผลให้เป็นอุปสรรคในการเผาไหม้ เกิดการสูญเสียความร้อนและเกิดมลพิษสูง
3. ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ มีความจำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก และต้องใช้อุปกรณ์ในการจัดการ การเก็บรักษา การขนส่ง และการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่
4. รูปแบบกายภาพไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว ไม่สะดวกต่อการขนถ่าย ตรวจสอบ เก็บรักษา หรือป้อนเข้า

ดังนั้น การแปลงสภาพชีวมวล จะช่วยในการลดปริมาณชื้นซึ่งส่งผลให้เพิ่มค่าความร้อนและมีความสะดวกในการเก็บรักษา และปรับปรุงคุณลักษณะของชีวมวลให้สะดวกต่อการใช้และการจัดการ เช่น การแปลงสภาพให้เป็นของเหลวหรือก๊าซ เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ [14] คือ

1. กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง (Densification) การคัดแยกเฉพาะส่วน และการหีบคั้นน้ำมัน (Oil extraction)
2. กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical conversion) ที่ใช้กิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยย้ออากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล
3. กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) โดยกระบวนการนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆได้อีกคือ การเผาไหม้ ไพโรไลซิส และแก๊สซิฟิเคชัน

ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้และวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ

2.2 เทคโนโลยีการปรับปรุงชีวมวลทางเคมีความร้อน

การเปลี่ยนมวลชีวมวลให้เป็นพลังงาน โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนมาทำให้โครงสร้างทาง

เคมีของมวล ชีวมวลนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานตามความต้องการ กระบวนการทางเคมีความร้อนอาจแบ่งออกเป็น 3 วิธี [14] คือ

2.2.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนร่วมกับการเกิดความร้อนสูงและแสง เป็นปรากฏการณ์ที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา เมื่อใช้สารชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีความร้อนเกิดขึ้นโดยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ที่เผาไหม้ได้ และไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสารชีวมวลทำปฏิกิริยากะออกซิเจนเรียกว่าการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาในเฟสแก๊ส ปฏิกิริยาบนพื้นผิว หรือทั้งคู่ตามตัวกระบวนการหลอมเหลว การระเหยและไพโรไลซิส ในปฏิกิริยาการเผาไหม้จริงเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างที่ซับซ้อนเช่น การระเหย การแพร่ การผสม การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสี และการเกิดเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง เชื้อเพลิงเผาโดยตรงในเฟสก๊าซในการการเผาไหม้เป็นแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (Premix combustion) และการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงแพร่กระจาย (Diffuse combustion) เชื้อเพลิงของเหลวจะถูกเผาเหมือนเป็นก๊าซเผาไหม้ได้ในเฟสก๊าซหลังจากการระเหยที่พื้นผิวซึ่งเรียกว่าการเผาแบบระเหย น้ำมันจะถูกเผาในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) แต่การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) [13] ยังดำเนินต่อไปซึ่งจะสลายเชื้อเพลิงบางส่วนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา

รูปแบบการเผาไหม้ของการเผาไหม้สารชีวมวลโดยตรงซึ่งเป็นของแข็งนั้นได้แก่ การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) การเผาไหม้ที่พื้นผิว (Surface combustion) การเผาไหม้แบบช้าๆที่ไม่มีไฟแต่มีควัน (Smoldering combustion) ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหยนั้น เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยสารประกอบพื้นฐานซึ่งโครงสร้างโมเลกุลจะมีจุดหลอมเหลวต่ำและระเหยได้โดยการให้ความร้อน และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสก๊าซและเกิดการเผาไหม้ ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวโดยการให้ความร้อน (H_2 , CO , C_mH_n , H_2O และ CO_2) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสก๊าซ และเกิดเปลวไฟและเกิดการเผาไหม้ โดยปกติขาร์บอนจะเหลือหลังจากการเผาไหม้ชนิดนี้และถูกเผาด้วยการเผาไหม้ที่พื้นผิว การเผาไหม้ที่พื้นผิวเกิดในกรณีของสารองค์ประกอบประกอบด้วยคาร์บอนที่มีสารระเหยได้สะสมอยู่เล็กน้อยเท่านั้น เช่น ถ่านหิน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำจะแพร่เข้าไปในรูที่มีอยู่ในหรือพื้นผิวของของแข็งของสารนั้นและเกิดเผาไหม้โดยปฏิกิริยาที่พื้นผิว การเผาไหม้ช้าๆแบบไม่มีไฟแต่มีควันนั้นเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดไฟติดของสารระเหยของเชื้อเพลิงที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้นั้นเช่น ไม้ ถ้าการติดไฟทำให้เกิดควันหรืออุณหภูมินั้นเกินกว่าจุดติดไฟการเผาไหม้การเผาไหม้ที่มีไฟจะเกิดขึ้น รูปแบบการเผาไหม้หลักในการเผาไหม้ของสารชีวมวลโดยตรงในอุตสาหกรรมนั้น ได้แก่ การเผาแบบเชื้อเพลิงสลายตัวและการเผาไหม้ที่พื้นผิว

ในอุตสาหกรรมการเผาไหม้ อากาศส่วนเกินถูกเติมเข้าไปในปริมาณหนึ่งเพิ่มจากปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ของสารชีวมวล ถ้าอัตราการเติมอากาศส่วนเกินสูงเกินไปจะทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้ลดต่ำลงและประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดต่ำลงด้วย ดังนั้นวิธีในการเผาสารชีวมวลถูกนำมาใช้ ได้แก่ การเผาไหม้แบบตะแกรง (แบบนิ่งและแบบเคลื่อนไหว) (Fixed grate,

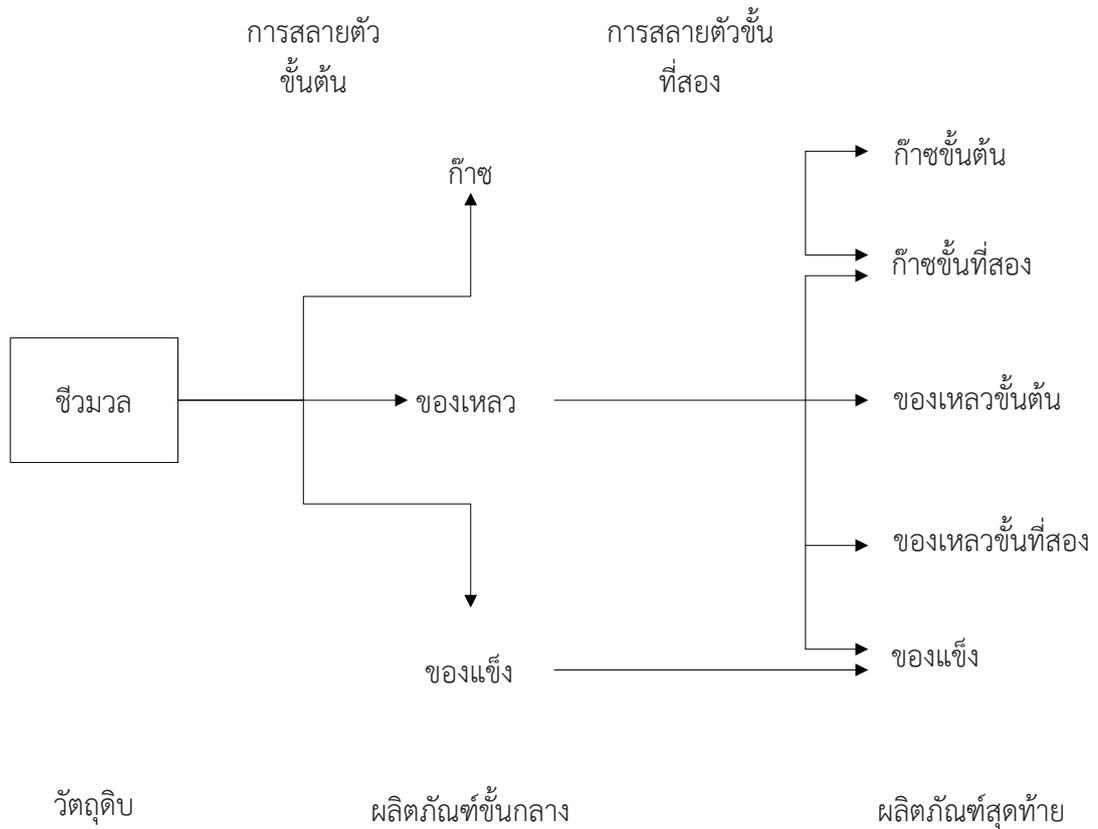
moving grate) การเผาไหม้แบบฟลูอิดไคด์เบด (Fluidized bed combustion) การเผาไหม้แบบเตาฮาร์ทแบบหมุน (Rotary hearth furnace combustion) การเผาไหม้แบบเตาเผา (Burner combustion) รูปแบบการเผาในแต่ละวิธีแสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล [13]

วิธีการเผาไหม้	ชนิดของการเผาไหม้	ลักษณะสำคัญ
การเผาไหม้แบบ Fixed bed	ตะกรับวางแนวนอน/เอียง ตะกรับที่มีน้ำหล่อเย็น ตะกรับที่มีการทิ้งขี้เถ้า	ตะกรับเป็นชั้นหรือเป็นแบบเอียงชั้น การเผาไหม้ของสารชีวมวลเป็นการเผาไหม้พื้นผิว ใช้ในเตาเผาแบบbatchขนาดเล็ก สำหรับสารชีวมวลที่มีขี้เถ้าน้อย
การเผาไหม้แบบ Moving bed	ตะกรับเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ตะกรับเคลื่อนที่ไปข้างหลัง ตะกรับแบบเป็นชั้น ตะแกรงคล้ายบานเก็ต	ตะกรับจะค่อยๆเคลื่อนที่และ และถูกแบ่งเป็นโซนเผาไหม้และโซนหลังจากเผาไหม้ เนื่องจากมีการปล่อยขี้เถ้าอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตะกรับมีขนาดใหญ่ เพื่อลดการกีดขวางของขี้เถ้าในการเผา สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้ตั้งแต่เป็นเศษเล็กๆ จนถึงเป็นขนาดบล็อค
การเผาไหม้แบบ Fluidized bed	การเผาไหม้ระบบฟลูอิดไคด์เบดแบบฟองอากาศ การเผาไหม้ระบบฟลูอิดไคด์เบดแบบหมุนเวียน	ใช้ทรายเป็นเบด โดยให้ทรายและเชื้อเพลิงที่อยู่ในเตาหลอมนั้นอยู่ในสถานะเดือดที่มีความดันของอากาศในการเผาไหม้สูงและเกิดการเผาไหม้ผ่านความร้อนที่กักเก็บในทรายและผลการส่งผ่านความร้อนของทราย เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงและมีคุณภาพต่ำ
การเผาไหม้ Rotary hearth furnace	เตาหลอมแบบ Kiln	ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูงเช่น กากตะกอนของสารอินทรีย์เหลวและเศษอาหารหรือของเสียขนาดใหญ่ ความสามารถในการไหลถูกจำกัดโดยขนาดของเชื้อเพลิง
การเผาไหม้แบบ Burner	เครื่องพ่นไฟ (Burner)	เผาผงไม้หรือผงขนาดละเอียดเช่น เนื้อเยื่อที่อยู่ส่วนกลางของลำต้นอ้อยด้วยเครื่องพ่นไฟ เหมือนกับที่เผาเชื้อเพลิงเหลว

2.2.2 ไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) มีนิยามว่าเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ที่ทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศแบบไร้ออกซิเจน ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส เชื้อเพลิงชีวมวลจะเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นชั้นๆแล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนของก๊าซของเหลว [12] [14] และของแข็งออกมาแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล [14]

ของแข็งที่ได้เรียกว่า ถ่านชาร์ (Charcoal) ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุถ่านเป็นหลักและมีเถ้าอินทรีย์ผสมอยู่ด้วย ของเหลวที่ควบแน่นได้ที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า ของเหลวไพโรลิกเนียส (Pyrolygneous liquid) หรือกรดไพโรลิกเนียส (Pyrolygneous acids) หรือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) ลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ บางครั้งเรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-crude oil) กระบวนการไพโรไลซิส สามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะใดสถานะหนึ่งมากที่สุดได้ โดยการควบคุมปัจจัยที่สำคัญต่างๆของกระบวนการเช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้นกระบวนการทางเคมีกายภาพที่เกิดขึ้นระหว่างไพโรไลซิสเป็นดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวล เพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างในชีวมวลให้สูงขึ้น
2. การเริ่มเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการปล่อยไอสารระเหย และเกิดถ่าน
3. การไหลของไอสารระเหยโมเลกุลร้อนผ่านเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน
4. การควบแน่นของไอสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วนในเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ และตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยขั้นต้นเป็นน้ำมันดิน
5. การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเองไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการแข่งขันแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา

6. การแตกตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น มีปฏิกิริยาร่วมเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงก๊าซ ปฏิกิริยาเปลี่ยนโมเลกุลของแข็งเป็นก๊าซด้วยน้ำ ปฏิกิริยาการรวมตัวของสารอนุมูล ปฏิกิริยาการไล่น้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความดัน

ในระหว่างปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ความชื้นจะระเหยก่อนที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นฮีมิเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 200-260 องศาเซลเซียส ตามด้วยเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 240-340 องศาเซลเซียส และลิกนินที่อุณหภูมิ 280-500 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุด ดังนั้นที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายใน 1 นาทีขณะที่ถ้าอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที ปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะสิ้นสุดภายใน 5 วินาที อัตราการให้ความร้อนที่สูงมีผลทำให้อัตราการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอนั้นรวดเร็วขึ้น ความดันเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลงและมีผลผลิตของของเหลวมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าไพโรไลซิสแบบเร็วหรือ ไพโรไลซิสแบบแฟลช ไดนาโมทีฟ(แคนาดา) และ บีทีจี (เนเธอร์แลนด์) ได้ทำการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเร็วซึ่งมีผลผลิตของของเหลวสูงถึง 60-80% เมื่อไม่มีความสามารถในการนำความร้อนเท่ากับ 0.12-0.42 W/mK ซึ่งคิดเป็นประมาณ 1 ใน 1000 ของค่าการนำความร้อนของทองแดง การถ่ายเทความร้อนนั้นมีความสำคัญมากในปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการนำไปปรับให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กก่อน

ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับสภาวะปฏิบัติการที่ใช้ ซึ่งหลักๆจะใช้เวลาหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นเกณฑ์ ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท[13] คือ

1.1 ไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าหรือแบบทั่วไป (Conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่มนุษย์รู้จักมานานแล้ว ซึ่งก็คือกระบวนการที่ใช้ในการทำถ่าน (Carbonization) ในการไพโรไลซิสทั่วไป ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนไปที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส ไอสารระเหยอยู่ในปฏิกิริยาเป็นเวลานาน 5-30 นาที ไม่หลุดออกไปเร็วจึงทำให้องค์ประกอบของไอสารระเหยยังคงเข้าทำปฏิกิริยากันอย่างต่อเนื่อง โดยได้เป็นถ่านและของเหลวออกมา กระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและอัตราการให้ความร้อนช้าหรือรักษาอุณหภูมิให้คงที่ จะมีผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะออกมา หากควบคุมกระบวนการให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและอัตราการให้ความร้อนช้า จะส่งผลให้เกิดถ่านชาร์มากขึ้น

2. ไพโรไลซิสแบบเร็ว

ไพโรไลซิสแบบเร็วจำเป็นต้องใช้อัตราการให้ความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับแบบช้า หากกระบวนการไพโรไลซิสมีอัตราการให้อัตราความร้อนสูงขึ้น ปริมาณการเกิดสารระเหย ก๊าซ และของเหลวจะมากขึ้นด้วย กระบวนการลักษณะแบบนี้เรียกว่า ไพโรไลซิสเร็วหรือเร็วมาก (Fast/Flash pyrolysis) โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะได้น้ำมันดิบชีวภาพประมาณ 60-70% โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ 15 - 25% และก๊าซเบาที่ไม่ควบแน่น 10 - 20% ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ไม่มีของเสียทิ้ง เนื่องจากก๊าซ ถ่าน และน้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด ในการไพโรไลซิสแบบเร็วมากมีขั้นตอนสำคัญอยู่ 4 ขั้นตอน คือ

2.1 การให้ความร้อนและการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูงมาก ซึ่งปกติจำเป็นต้องใช้ชีวมวลป้อนเข้าที่ถูกไม่แห้งเกินไปก่อน

2.2 การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสให้แม่นยำที่ประมาณ 400-650 องศาเซลเซียส

2.3 การควบคุมให้อุณหภูมิปล่อยออกมาเร็วและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อ โดยให้มีเวลาอยู่ในเตาปฏิกรณ์สั้นๆ โดยปกติไม่ควรเกินเวลามากกว่า 2 นาที

2.4 อุณหภูมิที่ได้ออกมาต้องถูกทำให้เย็นและควบแน่นโดยเร็ว เพื่อให้ได้ออกมาเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ

อัตราการให้ความร้อนในการไพโรไลซิสแบบเร็วมากอาจสูงถึง 1000 องศาเซลเซียสต่อ นาที อัตราการให้ความร้อนสูงและการทำไอระเหยให้เย็นอย่างรวดเร็วจะเป็นการแข่งกันปฏิกิริยา บางส่วนโดยไม่ให้เข้าร่วมทำปฏิกิริยาในการแตกตัวต่อเป็นก๊าซ จึงทำให้ได้สารประกอบชั้นกลางมาเป็นส่วนประกอบในน้ำมันดิบชีวภาพ อัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วทำให้เกิดถ่านชาร์น้อย ในบางสภาวะสามารถลดการเกิดถ่านชาร์ได้หมด หากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเกิดที่อุณหภูมิสูงมากๆ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นก๊าซ

2.2.3 แก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการในการเปลี่ยนวัตถุดิบชีวมวลของแข็งเป็นก๊าซเชื้อเพลิงหรือก๊าซวัตถุดิบตั้งต้นทางเคมี(syngas) คือแก๊สซิฟิเคชันหรือแก๊สซิฟิเคชันทางเคมีและความร้อน[13] สำหรับการจัดประเภทของวิธีแก๊สซิฟิเคชันจะถูกแบ่งออกตามส่วนประกอบของปัจจัยเงื่อนไขที่แสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทของวิธีแก๊สซิฟิเคชัน [13]

การแบ่งประเภท	ปัจจัยเงื่อนไข
ความดันแก๊สซิฟิเคชัน	ความดันปกติ (0.1-0.12 เมกกะปาสคาล) ความดันสูง (0.5-2.5 เมกกะปาสคาล)
อุณหภูมิแก๊สซิฟิเคชัน	อุณหภูมิต่ำ (700 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า) อุณหภูมิสูง (700 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า) อุณหภูมิสูงในการสลายตัว (จุดหลอมเหลวต่ำกว่าและสูงกว่า)
สารที่ทำให้เกิดแก๊สซิฟิเคชัน	อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำและ สารประกอบของสารเหล่านั้น คาร์บอนไดออกไซด์
การให้ความร้อน (การเกิดโซนอุณหภูมิ)	แก๊สซิฟิเคชันโดยตรง (ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของแก๊สซิฟิเคชัน บางส่วนของวัตถุดิบและออกซิเจน)แก๊สซิฟิเคชันโดยอ้อม (ให้ความร้อนแก่วัตถุดิบและสารที่ทำให้เกิดแก๊สซิฟิเคชันโดยความร้อนจากภายนอก)
ชนิดของ Gasifier	ฟิกซ์เบด (Fixed bed) โฟว์เบด (Flow bed) โฟว์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating flow bed) เบดแบบนำพาอนุภาคให้ไหลไปตามกระแสของของเหลว (Entrained bed) เบดที่มีการผสม (Mixing bed) เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) หอคู (Twin tower) เตาหลอมเหลว (Molten furnace)

การที่สารชีวมวลของแข็งจะเปลี่ยนเป็นก๊าซเผาไหม้ได้ สารที่ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนั้นมีความสำคัญสารนี้เรียกว่า สารที่ทำให้เกิดแก๊สซิฟิเคชัน อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำมาใช้เป็นสารผสมที่เหมาะสม อากาศ (ซึ่งทำปฏิกิริยากับออกซิเจน) และออกซิเจนที่เกิดจากความร้อนโดยการออกซิเดชัน และออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นลดประสิทธิภาพของของการเกิดก๊าซเผาไหม้ได้

โดยทั่วไปจะใช้วิธีแก๊สซิฟิเคชันโดยตรงที่มีการเผาไหม้บางส่วนของวัตถุดิบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิวัตถุดิบส่วนใหญ่ได้แก่เศษไม้และก้านข้าวโพด เต้าเผาแก๊สซิฟิเคชัน ส่วนใหญ่จะทำการความดันปกติและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยตรง เพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่ 800 องศาเซลเซียส และเพื่อแก๊สซิฟิเคชันโดยตรง อากาศ ออกซิเจนและไอน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมจำเป็น สารที่ช่วยให้แก๊สซิฟิเคชัน สำหรับจุดประสงค์ดังกล่าว ประมาณ 1 ใน 3 ของออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์หรือเรียกว่าอัตราส่วนออกซิเจนถูกนำมาใช้ร่วมกับการเผาไหม้บางส่วน (การออกซิเดชันบางส่วน) ทำให้เกิดแก๊สซิฟิเคชัน ค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์ขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ของก๊าซเผาไหม้ได้(คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ไฮโดรคาร์บอน) ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปก๊าซสามารถแบ่งออกเป็น ก๊าซที่มีปริมาณแคลอรีต่ำ(4 - 12 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ก๊าซที่มีปริมาณแคลอรีปานกลาง (12 - 28 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ก๊าซที่มีปริมาณแคลอรีสูง (มากกว่า 28 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) แก๊สซิฟิเคชันโดยตรงจะให้ก๊าซที่มีปริมาณแคลอรีต่ำ

2.3 กาลักความร้อน (Thermosyphon)

กาลักความร้อน (Thermosyphon) เป็นท่อความร้อนชนิดหนึ่งที่อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นตัวช่วยในการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อ กาลักความร้อนเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพคล้ายกับ Heat pipe ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่น่ามาประยุกต์ใช้งาน เพื่อการประหยัดพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานซึ่งมีการนำมาใช้ในงานหลายประเภทด้วยกัน ด้วยหลักการนี้เองทำให้กาลักความร้อน จึงเป็นท่อความร้อนที่สร้างได้ง่าย และมีราคาถูกที่สุดในบรรดาท่อความร้อนด้วยกัน โดยจะอธิบายโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนก่อนเป็นลำดับแรก หลังจากนั้นค่อยอธิบายถึงหลักการทำงานของท่อความร้อนชนิดนี้ อีกต่อไปตามลำดับ

2.3.1 โครงสร้างของกาลักความร้อน

จากรูปที่ 2.2 จะแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของกาลักความร้อน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

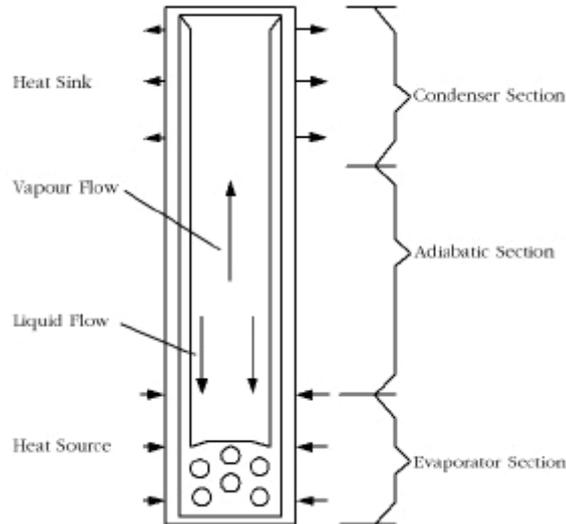
2.3.1.1 ส่วนทำระเหย (Evaporator section) คือ ส่วนที่สัมผัสกับแหล่งให้ความร้อน โดยที่ความร้อนจะทำให้สารทำงานภายในนั้นเกิดการระเหยกลายเป็นไอขึ้น

2.3.1.2 ส่วนฉนวน (Adiabatic section) คือ ส่วนที่สารทำงานเคลื่อนที่ผ่านไป โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนเกิดขึ้น

2.3.1.3 ส่วนควบแน่น (Condenser section) คือ ส่วนที่สารทำงานเกิดการควบแน่นจากไอกลายไปเป็นของเหลว

ภายในกาลักความร้อนจะมีสารทำงานบรรจุอยู่ ซึ่งสารทำงานนี้เอง จะเป็นตัวที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น โดยส่วนของฉนวนนั้นทำหน้าที่เป็นช่อง

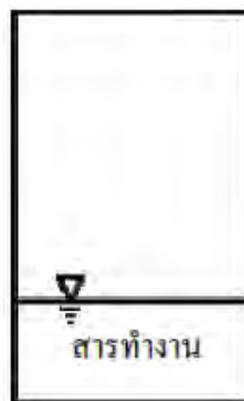
ของการไหลให้อุณหภูมิไหลผ่านจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น โดยส่วนของฉนวนนี้จะป้องกันไม่ให้ความร้อนที่สารทำงานพามาด้วยรั่วไหลออกไประหว่างทางก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนควบแน่น



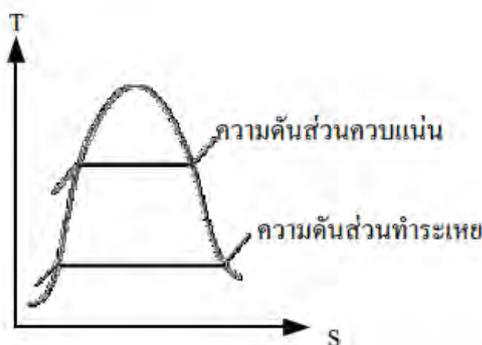
รูปที่ 2.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของกาลักความร้อน [15]

2.3.2 หลักการทำงานของกาลักความร้อน

หลักการทำงานของกาลักความร้อนผ่านพฤติกรรมของสารทำงานที่อยู่ภายในกาลักความร้อนที่อุณหภูมิห้อง โดยเริ่มจากสถานะที่ยังไม่เป็นกาลักความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปสารทำงานที่บรรจุอยู่ในท่อยังคงมีสถานะเป็นของเหลวอัดตัว เนื่องจากอิทธิพลของความดันบรรยากาศที่อยู่เหนือสารทำงาน สถานะของสารทำงานในขณะนี้แสดงบนแผนภูมิอุณหภูมิ - เอนโทรปีได้ดังรูปที่ 2.4 ในสถานะนี้สารทำงานจะไม่เปลี่ยนสถานะ จึงยังไม่มีเกิดการไหลเวียนของสารทำงานจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น ดังนั้นการส่งผ่านความร้อนจึงยังไม่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 กาลักความร้อนก่อนวางในแหล่งความร้อน [11]

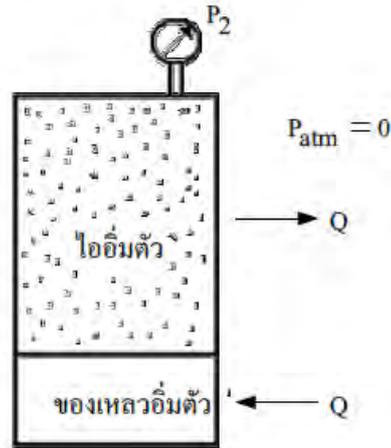


รูปที่ 2.4 ความแตกต่างของความดันและอุณหภูมิของกัลักความร้อน [11]

เมื่อลดความดันภายในห้อง สารทำงานจะเปลี่ยนจากของเหลวอัดตัวเป็นของผสมอิมิตัว ในสภาวะนี้สารทำงานในห้องจะอยู่ในสภาวะของเหลวอิมิตัวที่ด้านล่างของห้อง และไออิมิตัวที่ด้านบนของห้อง ที่สภาวะนี้จะมีสารทำงานอยู่เต็มห้อง และห้องนี้ถือว่าเป็นกัลักความร้อนแล้ว และพร้อมจะส่งผ่านความร้อน เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหยเพียงเล็กน้อย ในทางปฏิบัติเราจะไม่ค่อยๆลดความดันภายในห้อง แต่จะทำห้องให้เป็นสุญญากาศแล้วเติมสารทำงานลงไปในห้อง ดังนั้นเมื่อเติมสารทำงานแล้ว สารทำงานในห้องจะเป็นของผสมอิมิตัวที่มีความดันที่สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมขณะที่เติมสารทำงาน

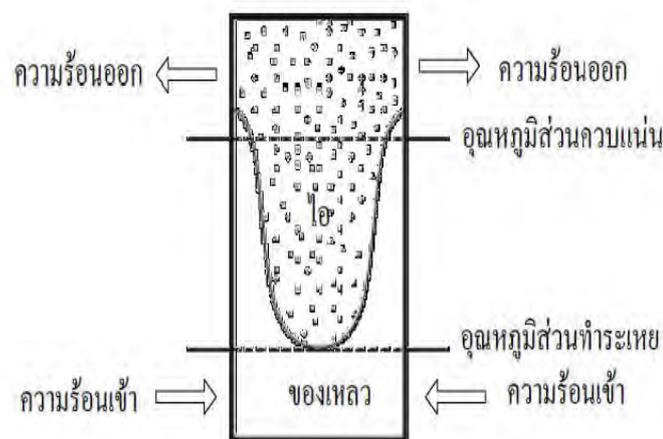
เมื่อนำกัลักความร้อนไปวางไว้ในแหล่งความร้อนและแหล่งให้ความร้อน ความแตกต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสองแหล่งนี้จะทำให้เกิดการไหลเวียนของสารทำงานขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

ในแหล่งให้ความร้อนนั้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นกว่าปกติจะทำให้สารทำงานในสถานะของเหลวที่อยู่ในส่วนทำระเหยของ กัลักความร้อนเกิดการเดือด/ระเหยการเป็นไอกลายเป็นไอและมีความดันสูงขึ้นและพาความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนออกไปด้วยในรูปของความร้อน ในขณะที่สารทำงานในสถานะในสถานะไอที่อยู่ในส่วนควบแน่นซึ่งเย็นกว่าจะเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวและมีความดันลดลง จากรูปที่ 2.5 จะเป็นกัลักความร้อน ขณะวางในแหล่งให้ความร้อนซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าไอไหลจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น ด้วยความแตกต่างของความดันระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ($P_2 - P_0$) เมื่อไอไหลเข้าสู่ส่วนควบแน่น มันจะมีอุณหภูมิและความดันลดลง และค่อยๆควบแน่นกลายเป็นของเหลวความร้อนแฝงจากการควบแน่นของสารทำงานจะถูกส่งผ่านออกไปยังแหล่งความร้อน ของเหลวที่เกิดขึ้นจากการควบแน่นจะสะสมรวมกันและกลายเป็นฟิล์มของเหลวจากส่วนที่ควบแน่นกลับลงสู่ส่วนทำระเหยที่อยู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อของเหลวไหลกลับเข้าสู่ส่วนทำระเหยก็จะเกิดการระเหยเป็นไอขึ้นอีกครั้ง และไหลกลับขึ้นไปยังส่วนควบแน่นและควบแน่นกลับลงสู่ส่วนทำระเหยเป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆ เนื่องจากการควบแน่นและระเหยที่เกิดขึ้นในกัลักความร้อน ทำให้เกิดการส่งผ่านความร้อนได้มาก แม้จะมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างแหล่งให้ความร้อนได้มาก แม้จะมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.5 กลไกความร้อนขณะวางในแหล่งให้ความร้อน [11]

น่าสังเกตว่าการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อความร้อนจะเกิดเป็นวัฏจักรได้ ก็ต่อเมื่อของเหลวในส่วนควบแน่นไหลกลับมาที่ส่วนทำระเหยได้เท่านั้น ดังนั้น หากไม่มีแรงโน้มถ่วง ท่อความร้อนชนิดนี้จะไม่สามารถทำงานได้ หรืออีกนัยหนึ่ง ก็คือ ท่อความร้อนชนิดนี้จะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อ ส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นเท่านั้น หากส่วนทำระเหยอยู่สูงกว่าส่วนควบแน่น สารทำงานที่ควบแน่นเป็นของเหลวจะไม่สามารถไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยได้ และการส่งผ่านความร้อนจะสิ้นสุดลงเนื่องจากไม่มีการไหลเวียนของสารทำงานเกิดขึ้นอีกต่อไป สิ่งนี้เป็นข้อจำกัดของกลไกความร้อนทำให้ กลไกความร้อนส่งผ่านความร้อนได้จากด้านล่างขึ้นสู่ ด้านบนของท่อเท่านั้น เราเรียกการส่งผ่านความร้อนจากด้านล่างของท่อขึ้นสู่ด้านบนว่า การให้ความร้อนด้านล่าง และด้วยการใช้แรงโน้มถ่วงช่วยในการไหลเวียนของสารทำงานนี้เอง ท่อกลไกความร้อนจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ท่อความร้อนที่อาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity assisted heat pipe) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนภายในกลไกความร้อน [11]

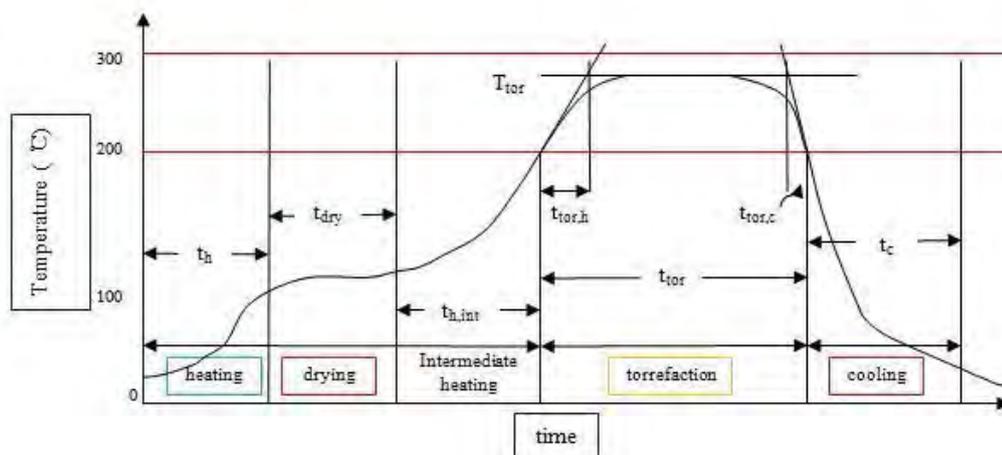
ดังนั้นสรุปได้ว่าการส่งผ่านความร้อนของกัลกความร้อน เกิดจากการระเหยกลายเป็นไอของสารทำงานที่อยู่ในส่วนทำระเหย และไหลไปยังส่วนควบแน่นซึ่งขณะกลายเป็นไอมันจะพาความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปด้วยในรูปความร้อนแฝง และเมื่อไอไหลเข้าสู่ส่วนควบแน่น มันจะคายความร้อนแฝงให้กับแหล่งรับความร้อน แล้วควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลกลับลง ส่วนสู่ทำระเหยอีกครั้งด้วย แรงโน้มถ่วงของโลกและเกิดการการไหลเวียนเป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆ การส่งผ่านความร้อนของท่อกัลกความร้อนอาศัยความร้อนแฝงจากการเปลี่ยนสถานะของของเหลวกลายเป็นไอของสารทำงาน แม้ว่าหลักการทำงานของท่อกัลกความร้อนจะง่ายและตัวตัวกัลกความร้อนก็มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน แต่การสร้างกัลกความร้อน ที่มีการส่งผ่านความร้อนที่ดี(ส่งผ่านความร้อนมากๆ) จะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองทางความร้อนของกัลกความร้อนเป็นอย่างดี

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการทอรีแฟคชั่น เป็นการปรับปรุงชีวมวลด้วยความร้อนทางเคมี ที่มีอุณหภูมิการดำเนินการอยู่ที่ 200 – 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อย ไม่มีออกซิเจนและอัตราความร้อนต่ำ กระบวนการทอรีแฟคชั่นนี้ เป็นการปรับปรุงชีวมวล ที่เพิ่มค่าความหนาแน่นของพลังงาน , ลดอัตราค่าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน , ความไม่ชอบน้ำ อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง มีและการเก็บชีวมวลในปริมาณที่มากขึ้นด้วย[7] [8] ในปีค.ศ.1930 หลักการของกระบวนการทอรีแฟคชั่นได้รับการรายงานในงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ ประเทศฝรั่งเศส เพื่อต้องการหาข้อมูลทางด้านเทคนิคและตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยในปีค.ศ.1980 Bourgois และ Doat ได้เริ่มทำการทดลองขึ้นกับไม้ 2 ชนิด ที่อุณหภูมิการทดลอง 2 อุณหภูมิ ซึ่งเป็นจุดกำเนิดในการตั้งโรงงานทอรีแฟคชั่นสาธิตเกิดขึ้นในปีค.ศ. 1987[6] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมากระบวนการทอรีแฟคชั่นได้รับความสนใจเป็นอย่างมากต่อการปรับปรุงชีวมวลเพื่อเป็นแหล่งของพลังงานทดแทนต่อไป ในขณะที่กระบวนการทอรีแฟคชั่นได้รับความสนใจอย่างมาก โดยเฉพาะในพื้นที่ยุโรปและอเมริกาเหนือที่มีการใช้งานอยู่อย่างมากมาย [16]

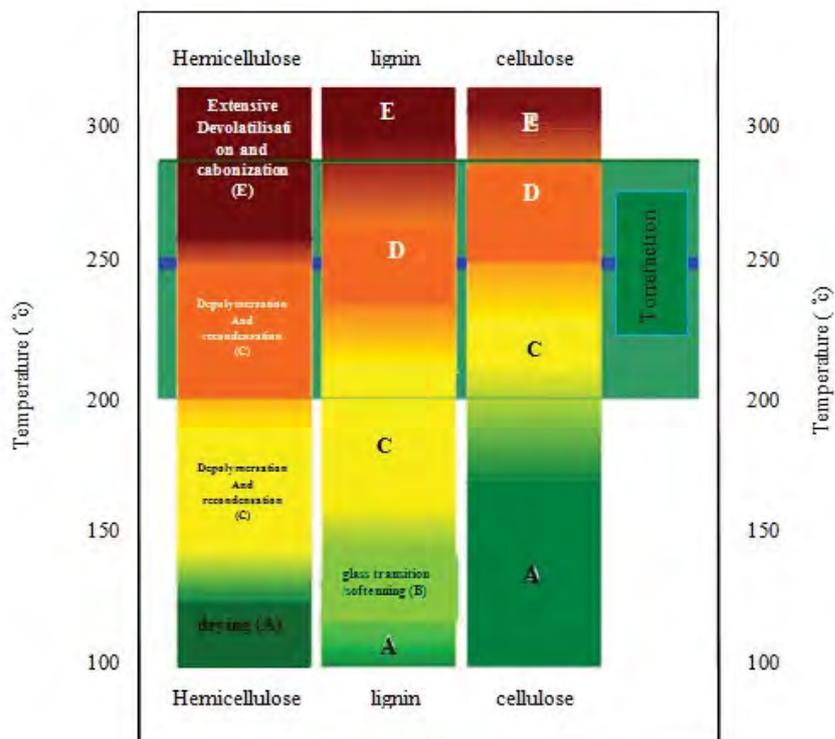
2.4.1 หลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชั่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ 1) การทำความร้อน 2) การอบแห้ง 3) การทำความร้อนขึ้นกลาง 4) ทอรีแฟคชั่นและการทำเย็น ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนของกระบวนการทอรีแฟคชัน [17]

ชีวมวลดิบถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในขั้นตอนการทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิชีวมวลดิบก่อนเข้าสู่การขึ้นตอนอบแห้ง ในกระบวนการทำความร้อนอัตราการทำความร้อนควรจะต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่ออนาที เมื่อชีวมวลดิบเข้าถึงอุณหภูมิที่ต้องการโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 90 – 105 องศาเซลเซียส เป็นการเริ่มต้นการอบแห้งชีวมวลดิบ น้ำอิสระภายในชีวมวลจะระเหยและปริมาณความชื้นของชีวมวลดิบจะลดลง มันเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเอาน้ำออกจากชีวมวลดิบ ซึ่งหากไม่มีการดำเนินการดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อผลของการย่อยสลายทางความร้อนชีวมวลดิบในขั้นตอนทอรีแฟคชัน[3] เมื่อขั้นตอนแรกสิ้นสุดลง ชีวมวลถูกให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันที่เรียกว่าขั้นตอนการทำความร้อนขั้นกลาง ในกระบวนการทอรีแฟคชัน อุณหภูมิของชีวมวลถูกรักษาให้คงที่ในช่วง 200 – 300 องศาเซลเซียส ในระหว่างช่วงเวลาที่การย่อยสลายทางความร้อน เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวในสารชีวมวลดิบในช่วงแรกอุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส ต่อมาลิกนินและบางส่วนของเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 270 - 300 องศาเซลเซียส[2, 3, 18] การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อนจะแสดงในรูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทอรีแฟคชันจะสำเร็จเมื่อการทอรีไฟล์ชีวมวลถูกเพิ่มในอุณหภูมิสูงและการทำเย็นนั้นจะต้องไร้ออกซิเจนหรือทั้งสองกระบวนการอยู่ในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของชีวมวลดิบจากการย่อยสลายตัวด้วยความร้อน [19]

2.4.2 ประเภทของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นและหลักการทำงาน

สำหรับประเภทของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น สามารถแบ่งออกอยู่เป็น 3 ประเภท คือเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการจะมีกำลังผลิตน้อยกว่า 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ส่วนเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระดับกึ่งอุตสาหกรรมมีกำลังผลิตอยู่ที่ 20 – 600 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระดับเชิงพาณิชย์จะมีกำลังการผลิตตั้งแต่ 600 กิโลกรัมต่อชั่วโมงขึ้นไป [2, 5, 18]

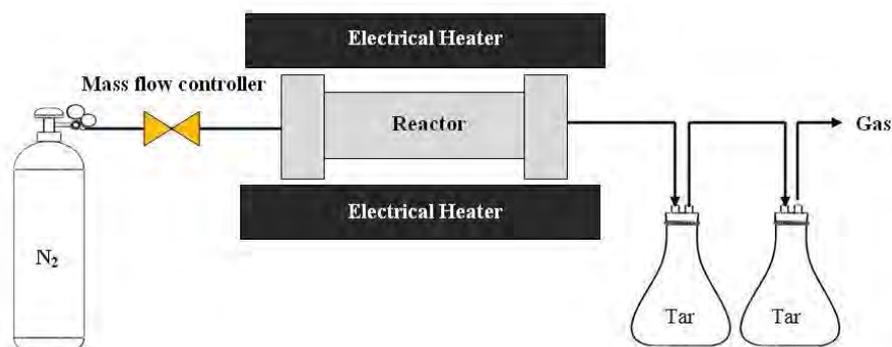
2.4.2.1 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระดับห้องปฏิบัติการ

สำหรับเตาทอรีแฟคชั่นในระดับห้องปฏิบัติการได้เริ่มมีการสร้างครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1930 เพื่อต้องการหาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่นเพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงพัฒนาเพิ่มขนาดของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับนำร่องอุตสาหกรรมต่อไปสามารถจะแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ

2.4.2.1.1 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด

สำหรับเตารูปแบบนี้ระบบไม่ค่อยจะยุ่งยากซับซ้อนมากนัก สำหรับหลักการทำงานของเตารูปแบบนี้คือ ชีวมวลจะถูกนำไปวางไว้ในตัวปฏิกรณ์ โดยจะมีแหล่งให้ความร้อนล้อมรอบ ซึ่งการให้ความร้อนจะให้อยู่ในรูปแบบของการให้ความร้อนแบบโดยตรงแสดงดังในรูปที่ 2.9 Jun et al. ได้ทำการทดลองก้านฝ้ายและฟางข้าวสาลีในเตาปฏิกรณ์ ผลพบว่า ชีวมวลหลังจากการทอรีแฟคชั่นมีค่าความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้นและดีขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบและมันยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะความไม่ชอบน้ำ[20] Medic et al. ทำการทดลอง โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นชีวมวลดิบในการทดลอง

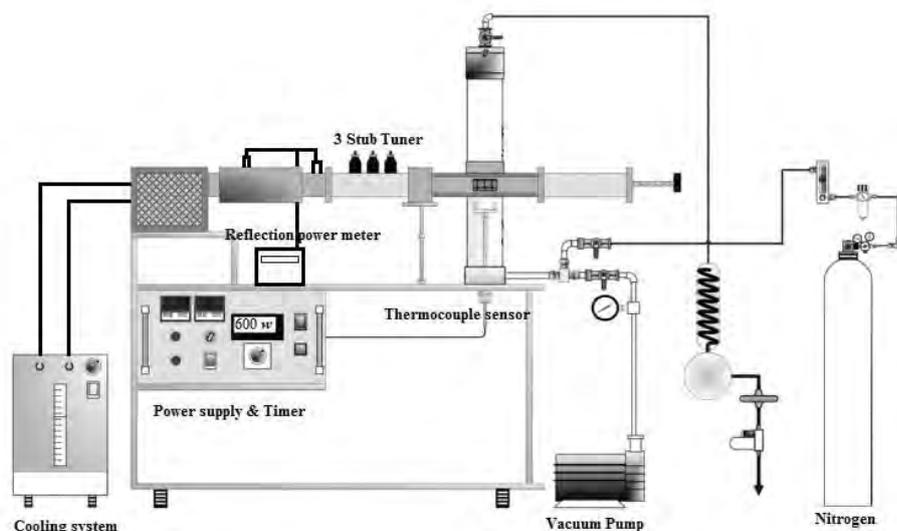
พบว่าความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้น 2 – 19 และน้ำหนักมวลลดลงถึง 45% [22] Rousset et al. ได้ทำการทดลองกับชีวมวล 3 ชนิดเปรียบเทียบกับพบว่าปริมาณคาร์บอนคงที่และความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้นทั้งเวลาและอุณหภูมิของทอริแฟคชั่นในขณะที่ปริมาณน้ำหนักมวลลดลงและชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำและค่าความร้อนสูงกว่าเดิมเมื่อเทียบวัตถุดิบนั้น [23] Uemura et al. ได้ทำการทอริไฟร์โดยมีวัตถุดิบเป็นของเสียจากปาล์มน้ำมัน [24] Bridgeman et al. ได้ศึกษาคุณสมบัติความสามารถในการบดของการทอริไฟล์ [25]



รูปที่ 2.9 เตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่นแบบฟลักซ์เบต [21]

2.4.2.1.2 เตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ

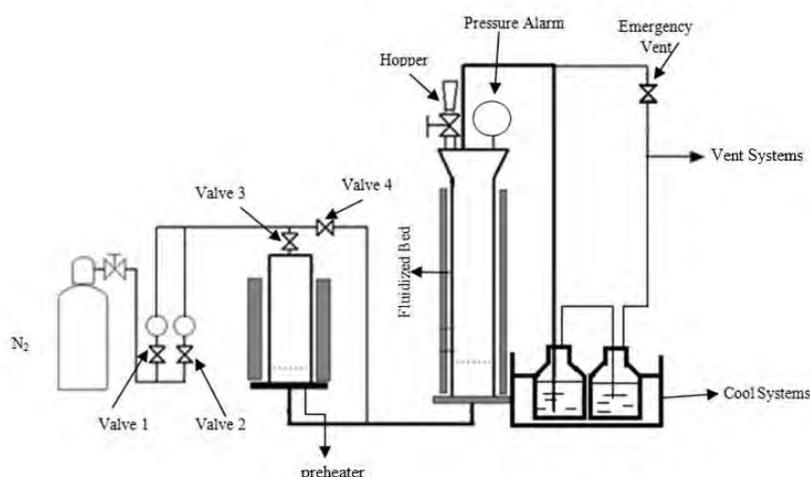
เตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่เรียกว่าคลื่นไมโครเวฟสำหรับการสั่นสะเทือนโมเลกุลของน้ำภายในชีวมวลทำให้เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชีวมวล Wang et al. ได้ทำการทดลองนำเกลบและชานอ้อยมาใช้ในการทดลอง โดยไมโครเวฟจะใช้ที่ความถี่ 2.45 GHz มีกำลังทางไฟฟ้าสูงถึง 2,000 วัตต์ จากการทดลองจะพบว่าช่วยลดอัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนของชีวมวลได้มากขึ้นในการเปรียบเทียบกับวิธีการทอริแฟคชั่นแบบเดิม และพบว่าค่าความร้อนเพิ่มขึ้นโดยเกลบเพิ่มขึ้น 26% และกากอ้อย 57% [26] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ [26]

2.4.2.1.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิดไคซ์เบด

หลักการการทำงานของเตารูปแบบนี้ คือนำชีวมวลไปวางไว้ที่ชั้นวางเพื่อให้อากาศไหลผ่าน ชั้นนี้ จากนั้นก็เพิ่มค่าความเร็วของอากาศถึงค่าหนึ่งชีวมวลที่วางอยู่จะลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล เริ่มให้ความร้อนแก่เตา ส่งผลให้เบตจะได้รับความร้อนจากภายนอก ทำให้เกิดการทอรีแฟคชั่นทั่วบริเวณเตา โดยปกติจะทำการทดลองที่สภาวะบรรยากาศเฉื่อย ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าใกล้เคียงตลอดทั่วทั้งกระบวนการ ทำให้เกิดกระบวนการทอรีแฟคชั่นสม่ำเสมอซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 Li et al. ได้ทำการการสร้างและทดลองในเตาปฏิกรณ์รูปแบบนี้ขึ้น โดยใช้ ชีลื้อยเป็นชีวมวลในการทดลอง ซึ่งพบว่าส่งผลในการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และเชิงกลของการทอรีแฟคชั่นชีลื้อย ได้แก่ พลังงาน, การกระจายขนาดอนุภาคและความสามารถในการดูดซับความชื้น [27]



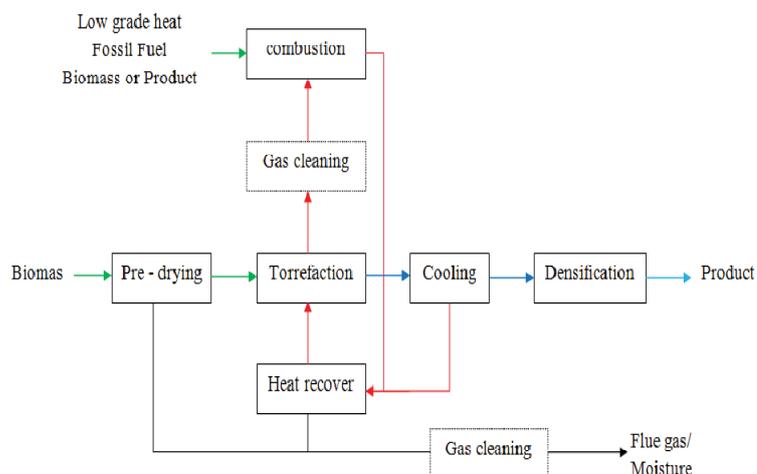
รูปที่ 2.11 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิดไคซ์เบต [27]

2.4.2.2 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระดับกึ่งอุตสาหกรรม

สำหรับการพัฒนาเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับนำร่องอุตสาหกรรม เป็นการยืนยันผลและตัวแปรที่เหมาะสมที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อต้องการเพิ่มขนาดในการผลิตเชิงพาณิชย์ให้ประสบความสำเร็จและความปลอดภัยต่อไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

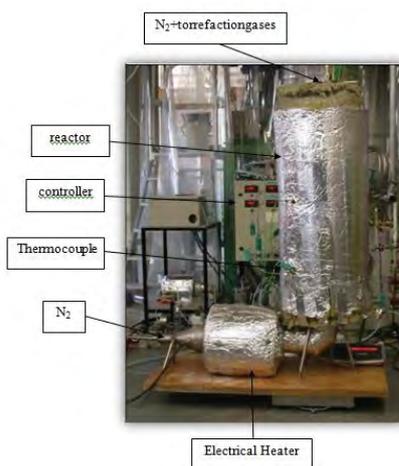
2.4.2.2.1 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด

หลักการการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด ในระดับกึ่งอุตสาหกรรมมีความคล้ายคลึงกับระดับห้องปฏิบัติการยกเว้นแหล่งความร้อน ระดับกึ่งอุตสาหกรรมได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลดิบเป็นแหล่งให้ความร้อน ในขณะที่ระดับห้องปฏิบัติการจะได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า แผนภาพกระบวนการของเตาปฏิกรณ์นี้ในระดับกึ่งอุตสาหกรรมจะแสดงในรูปที่ 2.12 เตาปฏิกรณ์นี้ในระดับกึ่งอุตสาหกรรมไม่สามารถดำเนินการอย่างต่อเนื่องได้



รูปที่ 2.12 แผนภาพกระบวนการของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบฟิกส์เบต [9]

ศูนย์วิจัยพลังงานของประเทศเนเธอร์แลนด์ ได้ออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ขึ้นในปี 2005 ซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 20 ลิตร [9] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบฟิกส์เบตของศูนย์วิจัยพลังงานของประเทศเนเธอร์แลนด์ [9]

2.4.2.2.2 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบฟลูอิดไชน์เบต

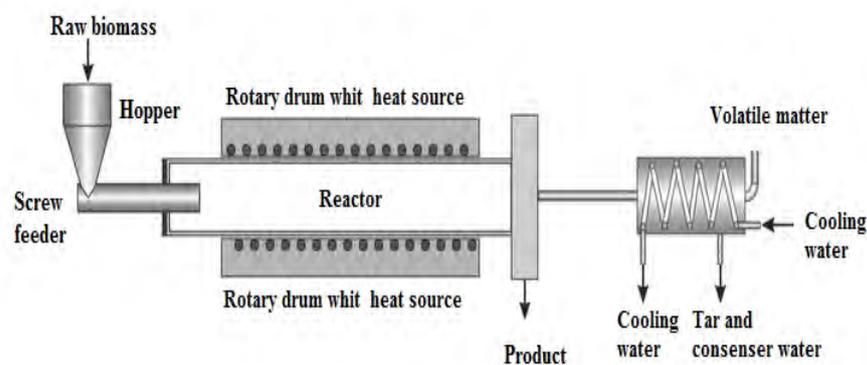
เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันนี้ในระดับกึ่งอุตสาหกรรมถูกพัฒนาโดยโทเปเลอีนอยี่ ในยุคปี 2010 กำลังการผลิตเครื่องปฏิกรณ์นี้คือ 60, 000 ตัน / ปี เตาปฏิกรณ์นี้มีเวลาการดำเนินการสั้นและมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง แม้ว่าเทคโนโลยีนี้จะเหมาะต่อการเพิ่มขนาด แต่ปัญหาที่พบจะเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดขนาดของอนุภาคและการสีกกร่อนภายในเตาปฏิกรณ์ [28]

2.4.2.2.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบมูฟวี่งเบต

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบมูฟวี่งเบต เป็นเตาปฏิกรณ์ที่อาศัยกลไกทางกลในการเคลื่อนที่หรือขนย้ายชีวมวลจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิดคือ

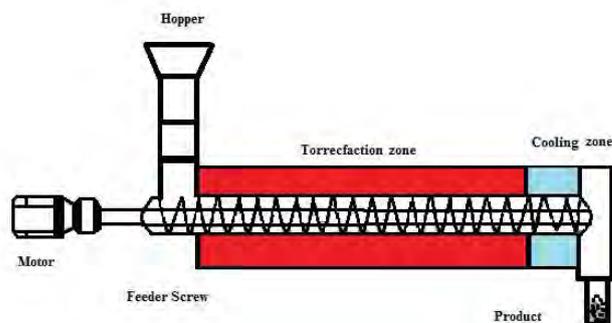
- เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชันแบบโรตารีคลิน ซึ่งเตาปฏิกรณ์แบบนี้จะมีลักษณะแนวคิดคล้ายกับเตาปฏิกรณ์ไพโรไลสิสระดับเชิงพาณิชย์ ชีวมวลที่จะนำมาใช้ในเตารูปแบบนี้จะต้องมี

ความชื้น 10 – 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งการให้ความร้อนจะกระทำในรูปแบบทางอ้อมและทางตรง โดยการให้ความร้อนทางอ้อมมีน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ส่วนการให้ความร้อนโดยตรงจะมีแหล่งความร้อนจากไอน้ำร้อนยิ่งยวด ความเร็วในการหมุนของเตาปฏิกรณ์นี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทอรีแฟคชั่น เมื่อความเร็วในการหมุนช้าเกินไปจะทำให้ชีวมวลกลายเป็นถ่านแทน แต่ถ้าหมุนเร็วเกินไปก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ทอรีแฟคชั่นมีคุณภาพต่ำ ซึ่งตัวแปรนี้จะเป็นตัวกำหนดถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์ทอรีแฟคชั่นว่าสูงหรือต่ำอย่างไร[28] [29] เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารีคิลินจะแสดงดังรูปที่ 2.14



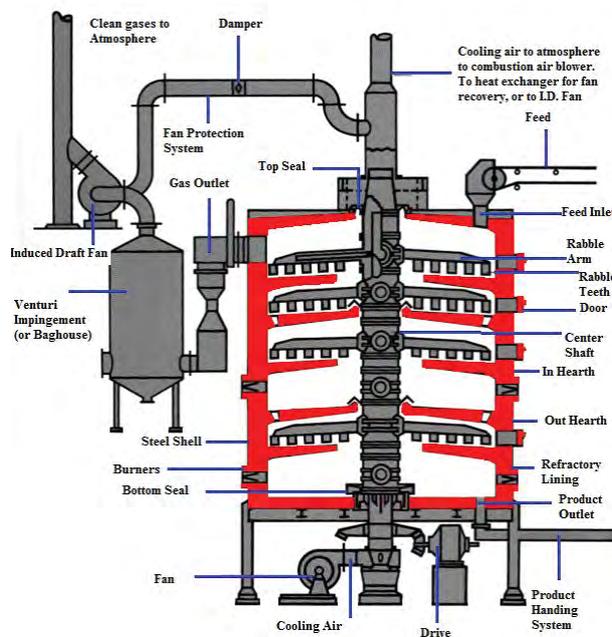
รูปที่ 2.14 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารีคิลิน

- เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรู เตาปฏิกรณ์แบบนี้จะแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยเตาปฏิกรณ์แบบนี้มีการให้ความร้อนด้วยการเผาไหม้แก๊สในกระบวนการทอรีแฟคชั่น สำหรับความร้อนในเตาปฏิกรณ์แบบสกรูจะมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนน้อยกว่าเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์เช่เบต ส่วนการป้อนชีวมวลนั้นจะถูกจำกัดด้วยขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 มิลลิเมตรและความชื้นต่ำๆ ดังนั้นจะพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดของอนุภาคชีวมวลจะมีผลต่อการเพิ่มขนาดของเตาปฏิกรณ์ [29] โดยบริษัท อีซีเอ็นได้มีการออกแบบและสร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 2008 มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 60–100 kg/h อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินการอยู่ที่ 220 – 280 องศาเซลเซียส [30]



รูปที่ 2.15 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรู [5]

- เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมัลติเฟิลเฮิร์ท สำหรับเตาชนิดนี้จะแสดงดังรูปที่ 2.16 โดยหลักการทำงานคือ ชีวมวลถูกป้อนจากด้านบนของเตาปฏิกรณ์นี้ลงไปยังเฮิร์ทแรกของเตา ชีวมวลดิบถูกให้ความร้อนโดยการสัมผัสกับพื้นผิวที่ร้อนของเฮิร์ท ต่อมาชีวมวลดิบจะถูกกวาดลงไปในเฮิร์ทที่สองและเฮิร์ทต่อไปโดยฟันกวาดที่ติดตั้งอยู่บนแขน [28]



รูปที่ 2.16 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบมัลติเฟิลเฮิร์ท

2.4.2.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระดับเชิงพาณิชย์

สำหรับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับเชิงพาณิชย์ สามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภทดังนี้

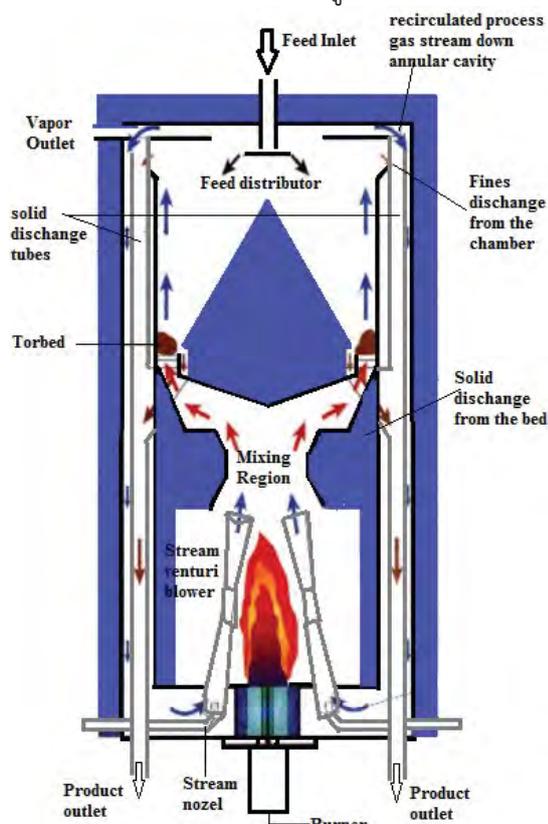
2.4.2.3.1 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด

เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานเพราะหลักการทำงานที่ง่าย หลักการทำงานของเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้จะคล้ายกับเตาปฏิกรณ์ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามยังพบข้อเสียสำหรับเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้เช่น กระจายอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ที่ไม่สม่ำเสมอและทั่วถึง บริษัท อินเทโกรฟลูเอล ได้สร้างเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ขึ้นในปี 2010 กำลังผลิตคือ 48,000 ตัน / ปี และพบว่า การสูญเสียน้ำหนักของสารชีวมวลคือ 20-30% เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น ขณะที่พลังงานจะเหลืออยู่ 90% [31]

2.4.2.3.2 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบทอร์เบด

รูปที่ 2.17 จะแสดงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบทอร์เบด หลักการทำงานของเตาในรูปแบบนี้คือ การไหลวนของความร้อนในรูปวงแหวนของเบด ซึ่งอัตราการป้อนอากาศมีความเร็วสูงถึง 50 – 80 เมตรต่อวินาทีผ่านทางมุมของใบพัด.ผลของการป้อนอากาศแบบนี้จะทำให้ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบจะไหลเวียนไปรอบๆของแนวแกนตั้งที่ตั้งอยู่ใจกลางของห้องปฏิกรณ์และรอบๆในแกนนอนของด้านข้างห้องปฏิกรณ์ [29] [32] ในปี 2007บริษัทโทเปปได้ทำการทดสอบระบบดังกล่าวเพื่อต้องการหาตัวแปรต่างๆในการผลิต และในปี 2010 ได้ทำการก่อสร้างโรงงานขึ้นที่เมืองดุยเว่น

ประเทศฮอลแลนด์ ซึ่งเตารูปแบบนี้จะดำเนินการอุณหภูมิอยู่ในช่วง 280 – 320 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการทอรีแฟคชั่นเพียง 90 วินาที โดยมีกำลังผลิตอยู่ที่ 60,000 ตันต่อปี [2] [5]



รูปที่ 2.17 เต่าปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบทอร์เบต [32]

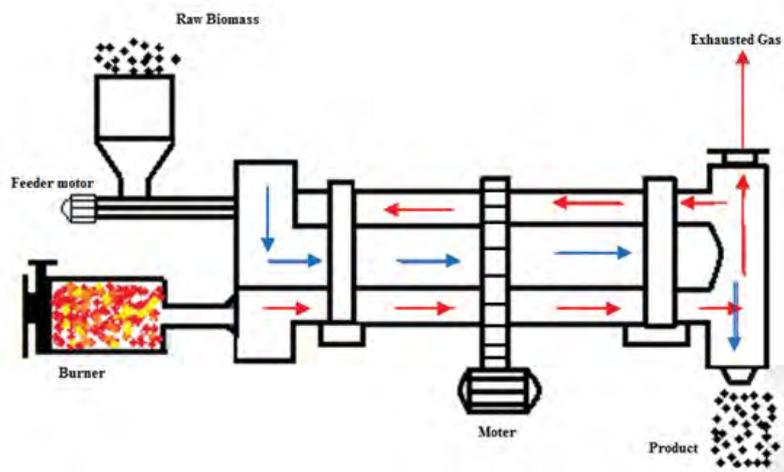
2.4.2.3.3 เต่าปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นสายพานลำเลียงสั้น

สำหรับหลักการทำงานของเต่าในรูปแบบนี้คือ การให้ความร้อนโดยตรงล้อมรอบห้องปฏิกรณ์ ซึ่งป้อนชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่นจะป้อนด้วยสายพานลำเลียงเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ และมีการสั้นตลอดเวลาในขณะที่การลำเลียงเพื่อให้เกิดการกระจายความร้อนและเกิดการทอรีแฟคชั่นอย่างทั่วถึง ระบบนี้จะมีการเอาแก๊สไอเสียที่เหลือจากกระบวนการดังกล่าวไปอบแห้งชีวมวลสดก่อนจะนำเข้าสู่การป้อนชีวมวลเพื่อการทอรีแฟคชั่น [29, 32] บริษัท อกริเทค โพรดิวเซอร์ ประเทศโคลัมเบีย ได้สร้างเตารูปแบบนี้ขึ้นเมื่อปี 2010 ให้ชื่อเตารูปแบบนี้ว่า ทอร์-เทค ซึ่งเตารูปแบบนี้จะดำเนินการอุณหภูมิอยู่ในช่วง 300 – 400 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการทอรีแฟคชั่นเพียง 30 นาที โดยมีกำลังผลิตอยู่ที่ 50,000 ตันต่อปี ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีพลังงานเหลืออยู่ 80 % [33]

2.4.2.3.4 เต่าปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารีดรัม

เต่าปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารีดรัมจะแสดงในรูปที่ 2.18 หลักการทำงานของเต่าในรูปแบบนี้คล้ายๆกับเต่าปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นสายพานลำเลียงสั้น แต่เครื่องนี้จะวางในแนวนอน โดยการให้ความร้อนจะให้ความร้อนโดยตรงต่อห้องปฏิกรณ์ ซึ่งห้องปฏิกรณ์จะถูกวางอยู่แกนกลางของเครื่อง ซึ่งจะอาศัยการหมุนไปเรื่อยเป็นการลำเลียงชีวมวลและเพื่อกระจายตัวของอุณหภูมิให้ทั่วถึงทั้ง

ห้อง โดยชีวมวลก่อนเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์จะผ่านอบแห้งมาก่อน [28] ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานชีวมวลตอนเหนือ ประเทศสวีเดน ได้สร้างเตารูปแบบนี้ขึ้นเมื่อปี 2011 โดยมีกำลังผลิตอยู่ที่ 25,000 – 30,000 ตันต่อปี และบริษัท แอสโมสเคลียร์ ได้สร้างขึ้นเมื่อปี 2010 โดยมีกำลังผลิตอยู่ที่ 50,000 ตันต่อปี



รูปที่ 2.18 เตารูปปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารีดรัม [5]

2.4.2.3.5 เตารูปปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ

เตารูปปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับเชิงพาณิชย์ได้รับการพัฒนาโดย บริษัท โรตาเวฟจำกัด ในปี 2011 ซึ่งมีกำลังการผลิต 110,000 ตัน / ปี [5]

2.4.2.3.6 เตารูปปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรู

เตารูปปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรูในระดับเชิงพาณิชย์ได้รับการพัฒนาโดย บริษัทไบโอเลคบีวี ในปี 2010 ซึ่งมีกำลังการผลิต 5,000 - 10,000 ตัน / ปีและบริษัทฟ็อกโคลบีวี ในปี 2012 มีกำลังการผลิตอยู่ที่ 35,000 ตัน / ปี [5]

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและสร้างเตาทอรีแพคชั้นแบบฟิกส์เบตพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่อถักความร้อนขนาดครึ่งละ 2 กิโลกรัม (อ้างอิงจากความหนาแน่นของไบอ้อย) พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรต่อกระบวนการทอรีไฟร์ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชีวมวลทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยและการทดลองมีเครื่องมือสำหรับงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล

เครื่องสับหยาบ

เครื่องสับหยาบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมชีวมวลโดยการย่อยชีวมวลดิบที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งลักษณะของชีวมวลที่ผ่านการสับหยาบจะยังมีขนาดใหญ่อยู่แต่มีขนาดเล็กลงกว่าเดิมมาก ซึ่งเครื่องสับหยาบที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องสับหยาบ

เครื่องบดละเอียด

เครื่องบดละเอียดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมชีวมวลดิบโดยการย่อยชีวมวลดิบที่มีขนาดเล็กให้มีขนาดเล็กกว่าเดิม ซึ่งอาจได้มาจากแหล่งกำเนิด โดยภายในของเครื่องจะมีตะแกรงขนาดต่างๆ เช่น 1, 2, 6, และ 12 มิลลิเมตรเป็นตัวคัดแยกขนาด เครื่องบดละเอียดที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องบดละเอียด

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

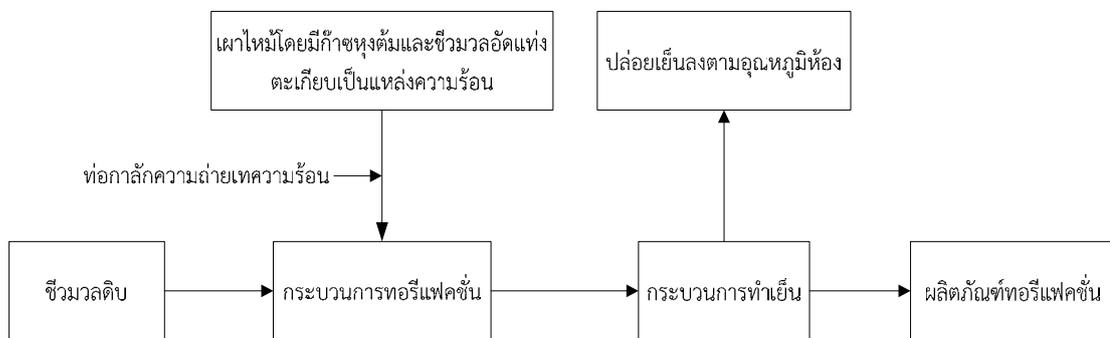
เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 3.3 แสดงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เตาปฏิกรณ์จะสร้างจากเหล็กหนา 2 มิลลิเมตรโดยมีขนาดกว้าง 37 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตรและสูง 150 เซนติเมตร เตาปฏิกรณ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนทอรีแฟคชั่นและส่วนให้ความร้อน ซึ่งความยาวของส่วนทอรีแฟคชั่นและส่วนให้ความร้อน 65 และ 85 เซนติเมตรตามลำดับ เตาแก๊สหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อนจะถูกวางไว้ในส่วนให้ความร้อน โดยมีท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นอุปกรณ์ที่ถ่ายเทความร้อนจากส่วนให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่น ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 5 ท่อจะถูกติดตั้งภายในซึ่งภายในเตาปฏิกรณ์ โดยขนาดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำมาจากเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 6 เซนติเมตร หนา 2.5 เซนติเมตร ยาว 110 เซนติเมตร โดยแบ่งออกเป็นส่วนระเหยและส่วนควบแน่น 50 และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ สารทำงานภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนคือ DOWTHERM-A ซึ่งอัตราการเติมสารทำงานคิดเป็น 50%



รูปที่ 3.3 เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับหลักการทำงานของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ชีวมวลจะถูกนำมาวางไว้ที่ส่วนทอรีแฟคชั่น โดยจะให้ความร้อนจากแก๊สหุงต้มและชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิงในการเป็นแหล่งความร้อน โดยท่ออากาศความร้อนจะเป็นตัวถ่ายเทความร้อนจากส่วนให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นที่เป็นระบบปิดเพื่อป้องกันไม่ให้มีอากาศไหลเข้า อุณหภูมิในส่วนทอรีแฟคชั่นจะถูกยกไปที่ 230, 250, และ 280 องศาเซลเซียสภายในเวลา 30 นาที จากนั้นอุณหภูมิจะถูกรักษาให้คงที่เป็นเวลาอีก 0.5, 1, และ 1.5 ชั่วโมง จากนั้นชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟร์จะถูกทำความเย็นลงตามอุณหภูมิห้อง โดยการกระดกส่วนทอรีแฟคชั่นที่อยู่ด้านบนมาลงสู่ส่วนล่างเพื่อให้ท่ออากาศความร้อนช่วยกระจายความร้อนที่ส่วนทอรีแฟคชั่นออกมาสู่ภายนอก ซึ่งแผนผังหลักการทำงานของรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หลักการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับห้องปฏิบัติการ

แหล่งให้ความร้อน

สำหรับแหล่งการให้ความร้อนสำหรับการทดลองตอนที่ 1 จะใช้แก๊สหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อน ซึ่งจะถูกวางไว้ที่ด้านล่างของส่วนให้ความร้อน แก๊สหุงต้มที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แก๊สหุงต้ม

ส่วนสำหรับการทดลองตอนที่ 2 จะใช้เตาแก๊สซีฟิเออร์รูปแบบโดนต์ โดยมีชีวมวล (ฟางข้าว) อัดแท่งอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 เตาก๊าซซีฟิเออร์รูปแบบโดนต์

รูปที่ 3.7 ชีวมวล (ฟางข้าว) อัดแท่งอัดแท่งตะเกียบ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Temperature display)

สำหรับการวัดอุณหภูมิในส่วนให้ความร้อนและห้องทอรีแฟคชั่นจะถูกทำการไว้ด้วยการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด เค ซึ่งค่าของอุณหภูมิจะแสดงค่าโดยเครื่องวัดอุณหภูมิยี่ห้อ SHIMAX รุ่น MAC50 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

เครื่องชั่งน้ำหนัก

สำหรับการตรวจวัดน้ำหนักของชีวมวลก่อนและหลังการทอรีแฟคชั่น และปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของการทดลองทั้งสองจะถูกทำการวัดโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบวางพื้น ยี่ห้อ AND รุ่น EM-150KAL พิกัดน้ำหนัก 150 กิโลกรัม ค่าความละเอียด 10 กรัม เครื่องชั่งน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

3.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรม เชื้อเพลิงและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

สำหรับระยะเวลางานวิจัย ตอนต้นจะทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีและรูปแบบเตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั่นตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2554 ต่อมาเป็นการออกแบบและสร้างเตาขึ้นในเดือน มิถุนายน 2555 ส่วนทดลองใช้เตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั่นและหาเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการทดลองและเริ่มทำการทดลอง เก็บผลการทดลอง เริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม 2555 จนถึงเดือนเมษายน 2556 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองพร้อมเขียนรายงานการวิจัยตั้งแต่มกราคม 2556 เป็นต้นไป ซึ่งการดำเนินการตลอดระยะเวลาการวิจัยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย

รายการการดำเนินการวิจัย	ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย
- ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทอรีแพคชั่นและเตาปฏิกรณ์ ทอรีแพคชั่น	พ.ย. - มิ.ย. 2554
- ออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั่น	มิ.ย. - ต.ค. 2555
- ทดลองใช้รีแอกเตอร์และหาเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการทดลอง	ต.ค. 2555 - ม.ค. 2556
- ดำเนินการทดลองและทำการหาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการทอรีแพคชั่น คือ อุณหภูมิ ช่วงเวลาทอรีแพคชั่น	ม.ค. - เม.ย. 2556
- วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง	เม.ย. - ก.ค. 2556
- สรุปผลการวิจัยและเขียนรายงานการวิจัย	ก.ค.- ก.ย. 2556

3.4 งบประมาณการวิจัย

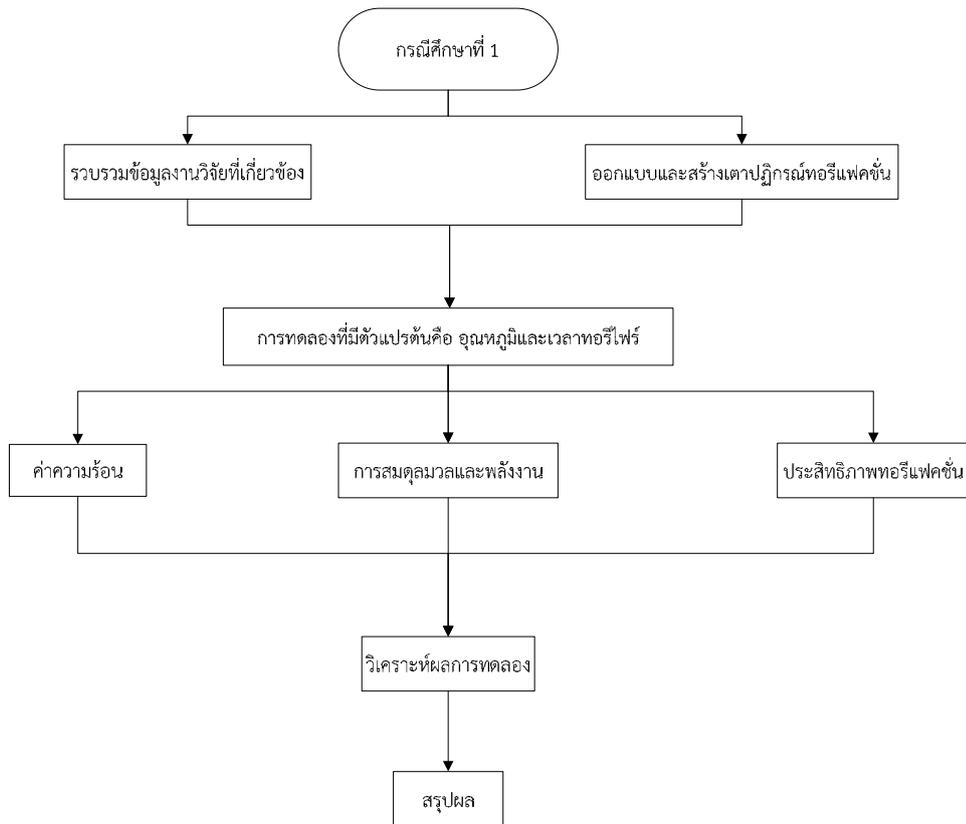
สำหรับการวิจัยนี้จะใช้งบประมาณเพื่อดำเนินการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนเงินโดยประมาณ 1,800,000 บาท โดยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) โครงการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดทอร์ไฟร์ (Torrefied Biomass) สำหรับชุมชน เพื่อการทดแทนการใช้ถ่านหิน และก๊าซปิโตรเลียมชนิดเหลว (LPG)

3.5 การวางแผนการวิจัย

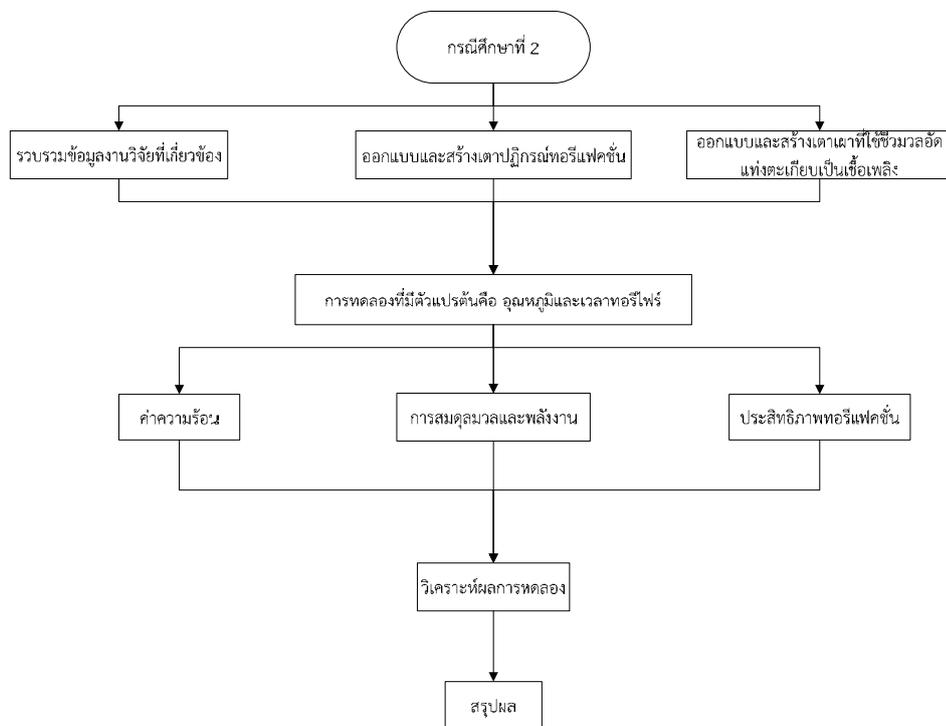
การวางแผนการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นแผนการดำเนินงานโดยรวมของงานวิจัยนี้และแผนการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 แผนการดำเนินงาน

สำหรับแผนผังการดำเนินการงานวิจัยในหัวข้อ การออกแบบและสร้างเตาทอร์ไพค์ชั้นแบบฟลักซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ทอกลักความร้อน ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณีศึกษา สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 จะเป็นการออกแบบและจัดสร้างเตาปฏิกรณ์ที่ใช้แก๊สหุงต้มเป็นแหล่งให้ความร้อน อีกทั้งยังศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อส่งผลต่อค่าความร้อน การสมดุลมวลและพลังงาน และประสิทธิภาพทอร์ไพค์ชั้น ซึ่งแผนการดำเนินงานการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.10 ส่วนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 จะเป็นการออกแบบเตาปฏิกรณ์ พร้อมทั้งออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้ชีวมวลอัดแท่งอัดแท่งตะเกียบเป็นแหล่งให้ความร้อน อีกทั้งยังศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อส่งผลต่อค่าความร้อน การสมดุลมวลและพลังงาน และประสิทธิภาพทอร์ไพค์ชั้น เพื่อตรวจสอบว่าหากมีแหล่งให้ความร้อนที่ต่างกัมนั้นจะมีผลต่อปัจจัยค่าต่างๆหรือไม่ ซึ่งแผนการดำเนินงานการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 จะแสดงดังรูปที่ 3.11



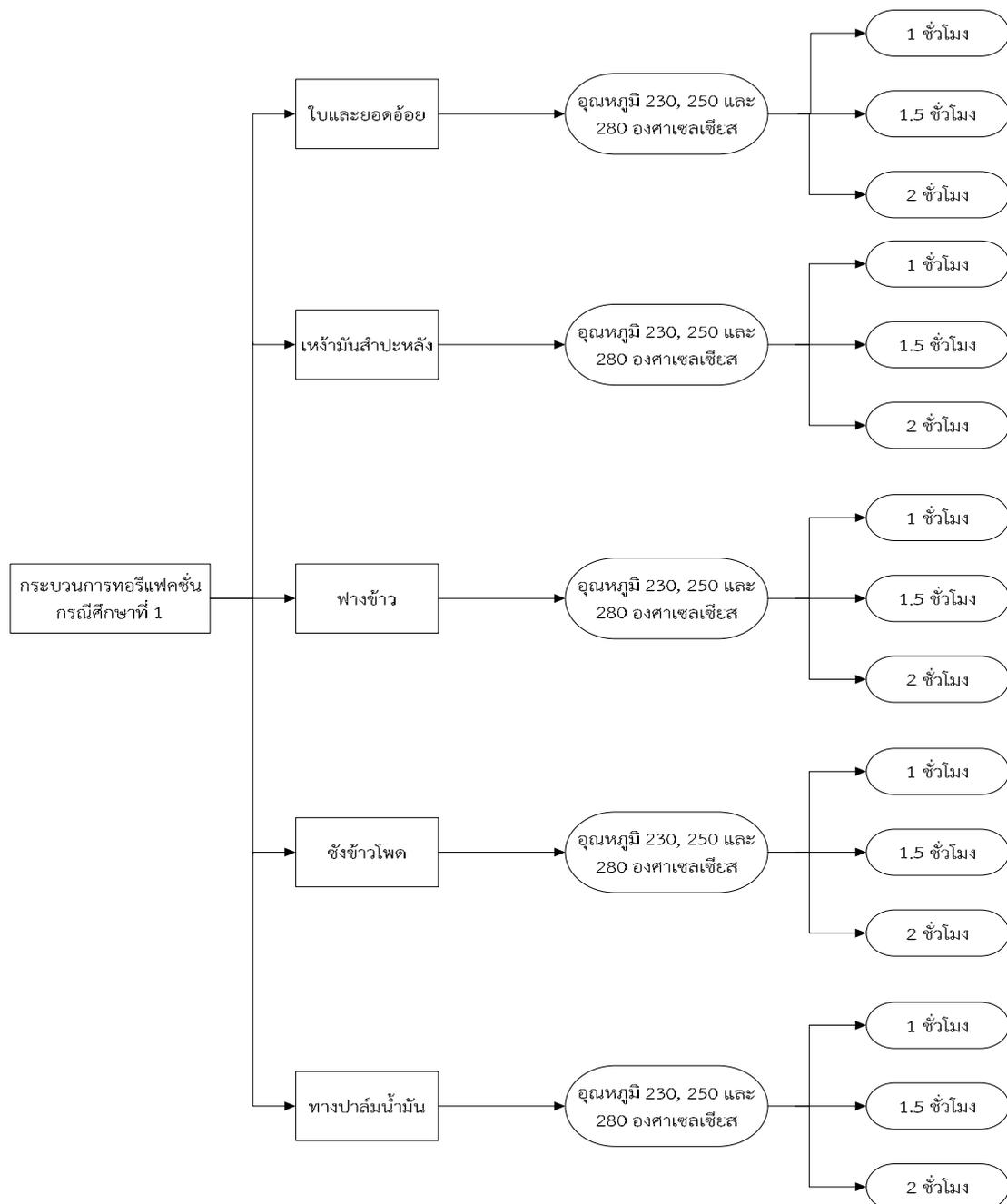
รูปที่ 3.10 แผนการดำเนินงานการทดลองกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 3.11 แผนการดำเนินงานการทดลองกรณีศึกษาที่ 2

3.5.2 แผนการทดลอง

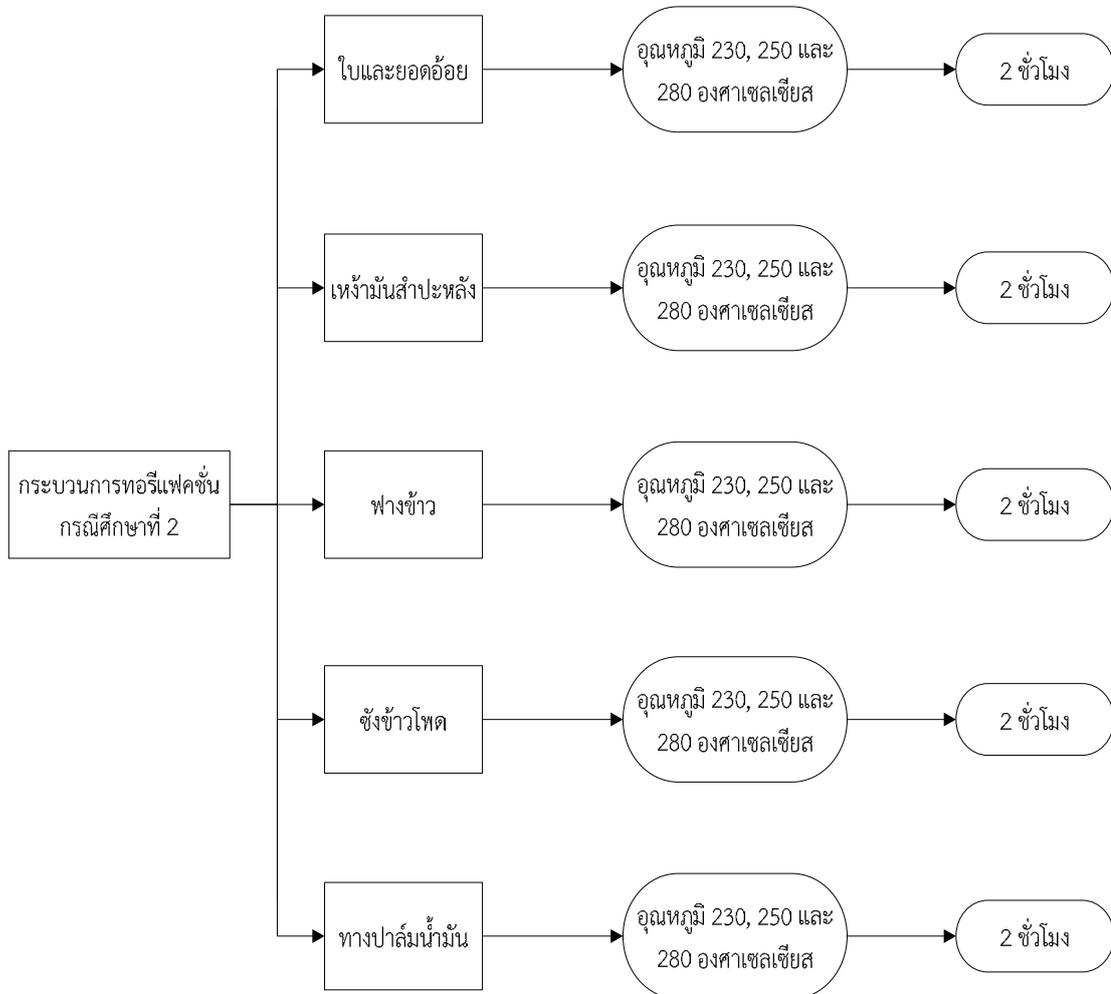
สำหรับแผนการทดลองในงานวิจัยนี้ จะทำการทดลอง 2 กรณีศึกษา คือ กรณีศึกษาที่ 1 การใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง และกรณีศึกษาที่ 2 ซิวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.12 แผนการทดลองกรณีศึกษาที่ 1

จากแผนการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 แสดงในรูปที่ 3.11 ซิวมวลที่ใช้ในการทดลอง 5 ชนิด คือ ใบและยอดอ้อย เหง้ำมันสำปะหลัง ซังข้าวโพด ทางปาล์ม และฟางข้าว ซึ่งแต่ละซิวมวลจะทำการ

ที่อุณหภูมิ 230, 250, และ 280^oC โดยที่การทดลองแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาการทดลองกรณีศึกษาที่ 1 คือ 1, 1.5, และ 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถสรุปจำนวนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.13 แผนการทดลองกรณีศึกษาที่ 2

จากแผนการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 แสดงในรูปที่ 3.13 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง 5 ชนิด คือ ใบและยอดอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ซังข้าวโพด ทางปาล์ม และฟางข้าว ซึ่งแต่ละชีวมวลจะทำการที่อุณหภูมิ 230, 250, และ 280^oC โดยที่การทดลองแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาการทดลองที่ 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถสรุปจำนวนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลอง

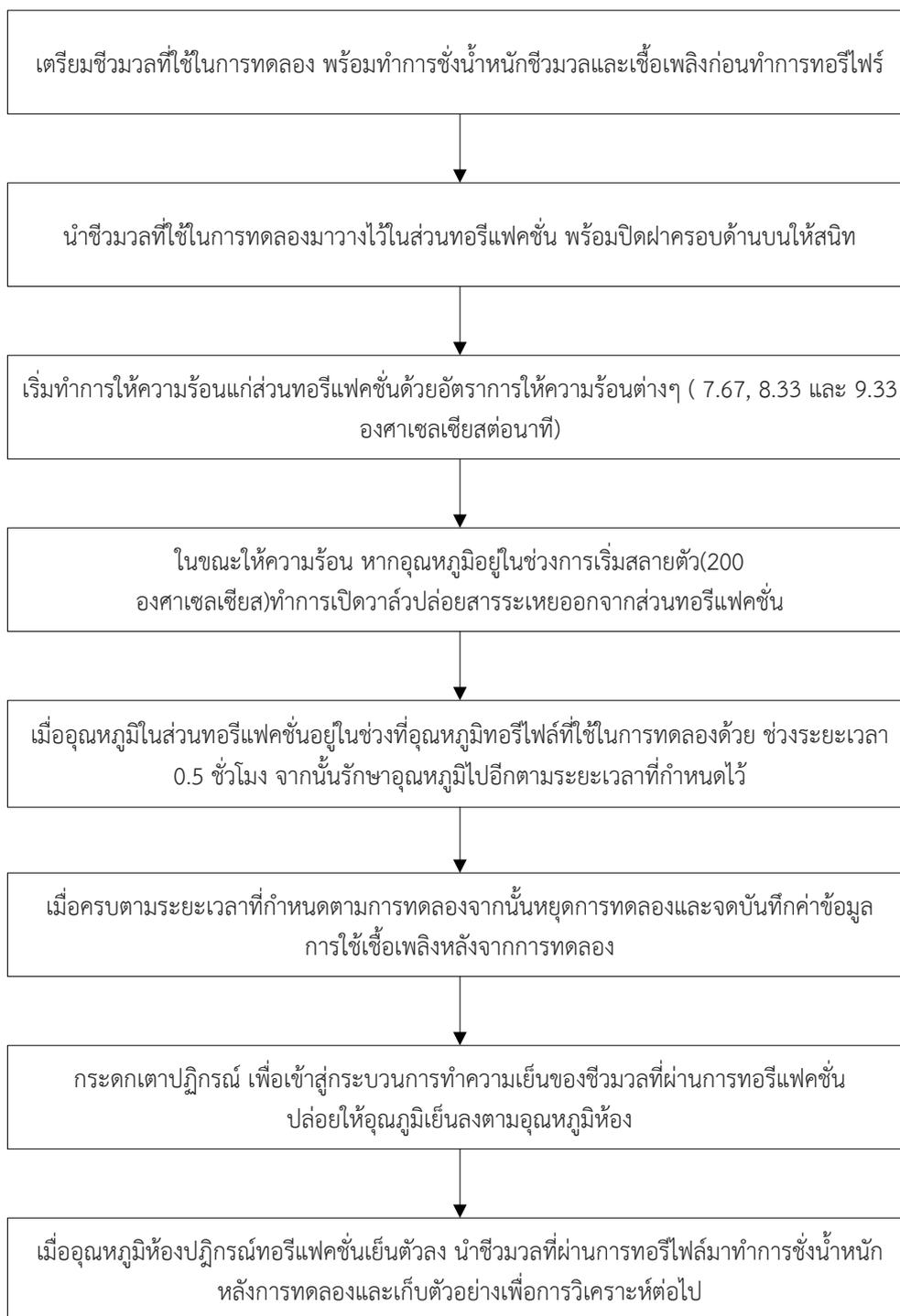
แหล่งความร้อน	ชนิดชีวมวล	อุณหภูมิการ ทอรีแฟคชั่น	เวลาการ ทอรีแฟคชั่น	จำนวนการ ทดลอง
ก๊าซหุงต้ม	ใบและยอดอ้อย	3	3	9
	เหง้ามัน สำปะหลัง	3	3	9
	ซังข้าวโพด	3	3	9
	ทางปาล์ม	3	3	9
	ฟางข้าว	3	3	9
ชีวมวลอัดแท่ง ตะเกียบ	ใบและยอดอ้อย	3	1	3
	เหง้ามัน สำปะหลัง	3	1	3
	ซังข้าวโพด	3	1	3
	ทางปาล์ม	3	1	3
	ฟางข้าว	3	1	3
จำนวนการทดลองรวมทั้งหมด				60

จากตารางที่ 3.2 สรุปจำนวนการทดลองรวมทั้งหมด โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา ซึ่งกรณีศึกษาที่ 1 จะใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงในแหล่งความร้อน สรุปได้ว่าชีวมวลแต่ละชนิดจะใช้เวลาในการทดลอง 9 การทดลอง สำหรับทุกชีวมวลในงานวิจัยนี้ จะใช้เวลาในการทดลองทั้งหมดประมาณ 45 การทดลอง ส่วนกรณีศึกษาที่ 2 ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิงในการเป็นแหล่งความร้อน 1 ชีวมวลจะใช้เวลาทดลองจำนวน 3 การทดลอง เมื่อรวมทุกชีวมวลจะใช้เวลาทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง ดังนั้นสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้รวมทั้งหมดเท่ากับ 60 การทดลอง

3.6 วิธีการทดลอง

จากรูปที่ 3.14 จะแสดงถึงขั้นตอนการทดลองของงานวิจัยนี้ ซึ่งในการทดลองของงานวิจัยนี้จะกำหนดอุณหภูมิ 3 ค่า (230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส) และ 3 เวลาการทอรีไฟร์(1,

1.5 และ 2 ชั่วโมง) ซึ่งในที่นี้จะอธิบายการทดลองที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อาจสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังต่อไปนี้ เตรียมชีวมวลที่ใช้ในการทดลองที่ผ่านอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวลแล้ว ทำการชั่งน้ำหนักชีวมวลและเชื้อเพลิงก่อนทำการทอรีไฟร์ พร้อมจดบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น นำชีวมวลที่ใช้ในการทดลองมาวางไว้ในส่วนทอรีแฟคชั่น พร้อมปิดฝาครอบด้านบนให้สนิท เริ่มทำการให้ความร้อนแก่ส่วนทอรีแฟคชั่นด้วยอัตราการให้ความร้อน 8.33 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นสังเกตอุณหภูมิภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น ซึ่งถ้าเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงการเริ่มสลายตัว(200 องศาเซลเซียส)ทำการเปิดวาล์วปล่อยสารระเหยออกจากส่วนทอรีแฟคชั่น เมื่ออุณหภูมิในส่วนทอรีแฟคชั่นอยู่ในช่วงที่อุณหภูมิทอรีไฟล์ที่ใช้ในการทดลองคือ 250 องศาเซลเซียสด้วยช่วงระยะเวลา 0.5 ชั่วโมง จากนั้นรักษาอุณหภูมิภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นและทอรีแฟคชั่นไปอีก 0.5 ชั่วโมง เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองครบตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ จากนั้นหยุดการทดลองและจดบันทึกค่าข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงหลังจากการทดลอง พร้อมกระดกเตาปฏิกรณ์ โดยกลับส่วนทอรีแฟคชั่นที่อยู่ด้านบนให้มาอยู่ส่วนล่าง เพื่อเข้าสู่กระบวนการทำความเย็นของชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟล์โดยไม่สัมผัสกับอากาศภายนอก ปล่อยให้อุณหภูมิเย็นลงตามอุณหภูมิห้อง จากนั้นสังเกตอุณหภูมิห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเมื่อเย็นตัวแล้ว ทำการนำชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟล์ที่อยู่ด้านบนออกมา พร้อมทำการชั่งน้ำหนักหลังการทดลองและเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการทดลอง

3.7 การวิเคราะห์ผล

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 หัวข้อหลักการวิเคราะห์ผลตามการทดลองดังนี้

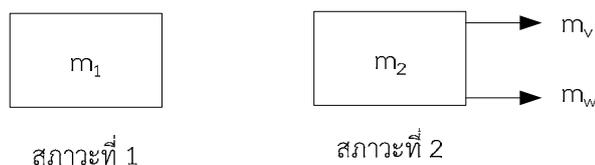
3.7.1 ค่าความร้อน

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวลดิบและชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น สามารถหาได้โดยบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อเลโก้(LECO) ตามมาตรฐาน ASTM D 5865-07a สำหรับค่าความร้อนที่ได้จากบอมบ์แคลอรีมิเตอร์จะเป็นค่าความร้อนสูง

3.7.2 การสมดุลมวลและพลังงาน

3.7.2.1 สมดุลมวล

การสมดุลมวลในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่สร้างขึ้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามไดอะแกรมที่แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การสมดุลมวล

จากสมการ

$$\sum m_i - \sum m_e = \Delta m_{cv} \quad (1)$$

เมื่อ ไม่มีการไหลเข้าของมวล

$$\sum m_i = 0 \quad (2)$$

พิจารณามวลที่ไหลออก

$$\sum m_e = m_w + m_v \quad (3)$$

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงมวลที่เกิดขึ้น

$$\Delta m_{cv} = m_2 - m_1 \quad (4)$$

นำสมการ (2), (3), และ (4) แทนลงใน (1) จะได้ว่า

$$-(m_w + m_v) = m_2 - m_1$$

ดังนั้น มวลของสารระเหยที่สูญเสียไปในกระบวนการทอรีแฟคชั่น เป็นดังสมการด้านล่าง

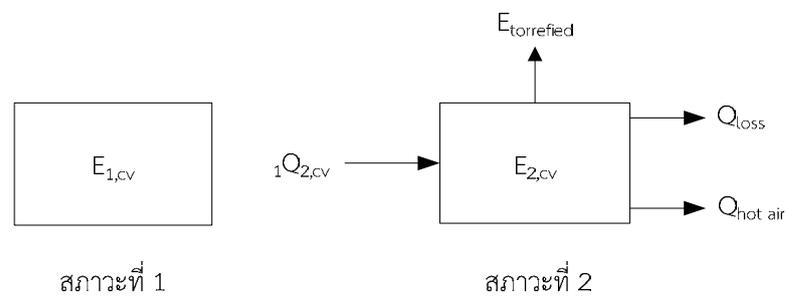
$$m_v = m_1 - (m_2 - m_w) \quad (5)$$

เมื่อ

m_w	มวลของความชื้นที่สูญเสีย
m_v	มวลของสารระเหยที่ไหลออกจากชีวมวล
m_1	มวลชีวมวลเริ่มต้น
m_2	มวลชีวมวลสุดท้าย

3.7.2.2 สมดุลพลังงาน

การสมดุลพลังงานในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่สร้างขึ้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามไดอะแกรมที่แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การสมดุลพลังงาน

จากสมการ สมดุลพลังงานแบบ Uniform Flow Uniform State จะได้ว่า

$$1Q_{2,cv} + \sum m_i (h_i + \text{vel}_i^2 + gz_i) - \sum m_e (h_e + \text{vel}_e^2 + gz_e) - 1W_{2,cv} - Q_{\text{loss}} - E_{\text{torrefied}} = \Delta E_{\text{cv}} \quad (1)$$

เนื่องจากไม่มีมวลไหลเข้าในสถานะที่ 2 จะได้ว่า

$$\sum m_i = 0 \quad (2)$$

และในสถานะที่ 2 ไม่มีงานเกิดขึ้น ซึ่งพบว่า

$$1W_{2,cv} = 0 \quad (3)$$

แทนค่า (2), (3) ลงใน (1) จะได้ว่า

$$1Q_{2,cv} - \sum m_e (h_e + \text{vel}_e^2 + gz_e) - Q_{\text{loss}} - E_{\text{torrefied}} = \Delta E_{\text{cv}} \quad (4)$$

พิจารณาความร้อนที่ไหลเข้า $1Q_{2,cv}$ พบว่า

$$1Q_{2,cv} = m_{\text{fuel}} \times \text{HHV}_{\text{fuel}} \times \eta_{\text{combustion}} \quad (5)$$

พิจารณาปริมาณความชื้นที่สูญเสีย จะพบว่า

$$\sum m_e (h_e) = m_{\text{hot air}} h_{\text{hot air}} \quad (6)$$

และความร้อนที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{convec}} + Q_{\text{rad}} \quad (7)$$

ซึ่งความร้อนที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากการพาความร้อน พิจารณาได้เป็น

$$Q_{\text{convec}} = Ah_m (T_s - T_a) \quad (8)$$

และความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสี พิจารณาได้เป็น

$$Q_{\text{rad}} = A\varepsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) \quad (9)$$

แทนค่า (8), (9) ลงใน (7) จะได้ว่า

$$Q_{\text{loss}} = Ah_m (T_s - T_a) + A\varepsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) \quad (10)$$

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณพลังงานภายใต้ปริมาตรควบคุม

$$\Delta E_{\text{cv}} = E_{\text{cv},2} - E_{\text{cv},1} \quad (11)$$

ซึ่ง

$$E_{\text{cv},1} = m_{\text{cv},1} c_v T_1 \quad (12)$$

และ

$$E_{\text{cv},2} = m_{\text{cv},2} c_v T_2 \quad (13)$$

แทนค่า (12), (13) ลงใน (11) จะได้ว่า

$$\Delta E_{\text{cv}} = (m_{\text{cv},2} c_v T_2) - (m_{\text{cv},1} c_v T_1) \quad (14)$$

$$\Delta E_{\text{cv}} = c_v ((m_{\text{cv},2} T_2) - (m_{\text{cv},1} T_1)) \quad (15)$$

แทนค่า (5), (6), (10), (15) ลงใน (4) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & (m_{\text{fuel}} \times \text{HHV}_{\text{fuel}} \times \eta_{\text{combustion}}) - (m_{\text{hot air}} h_{\text{hot air}}) - (Ah_m (T_s - T_a) \\ & + A\varepsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4)) - E_{\text{torrefied}} = c_v ((m_{\text{cv},2} T_2) - (m_{\text{cv},1} T_1)) \end{aligned} \quad (16)$$

ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชัน

$$\begin{aligned} & (m_{\text{fuel}} \times \text{HHV}_{\text{fuel}} \times \eta_{\text{combustion}}) - (m_{\text{hot air}} h_{\text{hot air}}) - (Ah_m (T_s - T_a) \\ & + A\varepsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4)) - c_v ((m_{\text{cv},2} T_2) - (m_{\text{cv},1} T_1)) = E_{\text{torrefied}} \end{aligned} \quad (17)$$

เมื่อ

$E_{\text{torrefied}}$	พลังงานที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น
m_{fuel}	มวลของแก๊สแห้งที่ใช้ในกระบวนการ
HHV_{fuel}	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง
$\eta_{\text{combustion}}$	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
$m_{\text{hot air}}$	มวลของลมร้อนที่ไหลออก (วัดอัตราความเร็ว)
$h_{\text{hot air}}$	ค่าเอนทาลปีลมร้อนที่ไหลออก คำนวณจาก $c_v (T_2 - T_1)$
เมื่อ	c_v ค่าความร้อนจำเพาะอากาศ เมื่อปริมาตรคงที่
	T_1 อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม
	T_2 อุณหภูมิของลมร้อน
A	พื้นที่ใช้ในการพาความร้อน
h_m	สัมประสิทธิ์ในการพาความร้อน
T_s	อุณหภูมิผิวร้อน
T_a	อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม
ϵ	ค่าสภาพการแผ่รังสี
σ	ค่าคงตัวสเตฟาน-โบลต์ซมันน์
T_w	อุณหภูมิการแผ่รังสีของวัตถุ

3.7.4 สัดส่วนผลได้เชิงมวล

น้ำหนักมวลของชีวมวลที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะถูกวัดหลังจากกระบวนการผลได้เชิงมวลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นถูกคำนวณตามสมการที่ 18

$$Y_{\text{mass}} = \left[\frac{M_{\text{tor}}}{M_0} \right]_{\text{dry basis}} \times 100 \quad (18)$$

เมื่อ Y_{mass} คือผลได้เชิงมวล (%)

M_0 คือน้ำหนักมวลของชีวมวลดิบ (kg)

M_{tor} คือน้ำหนักมวลของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (kg)

3.7.4 สัดส่วนพลังงานที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้

สำหรับสัดส่วนพลังงานที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ เป็นการแสดงพลังงานที่ได้จากกระบวนการต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ ซึ่งสัดส่วนพลังงานที่ได้จากกระบวนการสามารถคำนวณได้จาก ผลคูณของค่าความร้อนชีวมวลที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชั่นกับผลได้ของมวลจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น ต่อค่าความร้อนชีวมวลดิบ

3.7.5 ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น

ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น ใช้สำหรับการวัดประสิทธิภาพ การบ่งชี้บ่งชี้อัตราการเพิ่มหรือลดลงของพลังงาน และเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับทดลองของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่สร้างขึ้น โดยจะนำพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นมาคิดในรูปแบบของพลังงานที่ให้แกเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 19

$$\eta_{\text{tor}} = \left(\frac{\text{HHV}_{\text{tor}}}{\text{HHV}_0 + \frac{E_{\text{process}}}{M_0}} \right) \quad (19)$$

เมื่อ HHV_{tor} คือค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟร์ (MJ/kg), HHV_0 คือค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลดิบ (MJ/kg), M_0 คือมวลเริ่มต้น (kg) และ E_{process} คือพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น (MJ) ซึ่ง E_{process} สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 20

$$E_{\text{process}} = \text{HHV}_{\text{fuel}} \times \eta_{\text{com}} \quad (20)$$

โดยที่ HHV_{fuel} คือค่าความร้อนสูงสุดของแก๊สหุงต้มและชีวมวลอัดแท่งตะเกียบ, η_{com} คือประสิทธิภาพของหัวเผาแก๊สหุงต้มและเตาแก๊สซีไฟเออร์รูปแบบโดนัท

บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลงานวิจัย

สำหรับผลและการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ จะแบ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลออกเป็น 2 กรณีศึกษาคือ กรณีศึกษาที่ 1 การใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงและกรณีศึกษาที่ 2 การใช้ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง

4.1 ผลและการวิเคราะห์ผล: กรณีศึกษาที่ 1 การใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง

ในการศึกษาการทดลองเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้จะแบ่งการทดลองตามชีวมวล 5 ชนิดได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง ใบและยอดอ้อย ฟางข้าว ทางปาล์มน้ำมัน และซังข้าวโพด โดยที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงในการเป็นแหล่งให้ความร้อน สำหรับผลการทดลองเป็นดังนี้

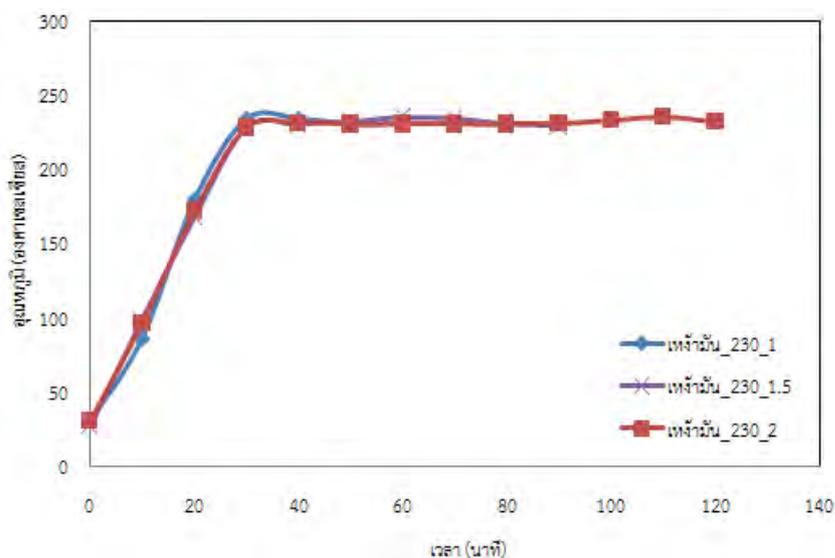
4.1.1 กรณีเหง้ามันสำปะหลัง

4.1.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่น

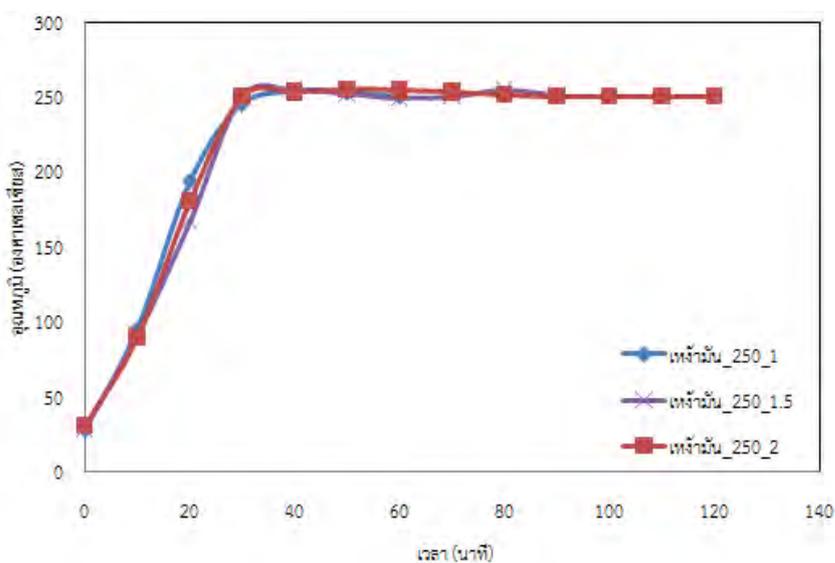
รูปที่ 4.1 - 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ สำหรับเหง้ามันสำปะหลัง ที่กำหนดอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ และข้อมูลในแต่ละกราฟจะแสดงเวลาในการทอรีแฟคชั่น 60, 90 และ 120 นาที จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และทุกเวลาในการทอรีแฟคชั่นนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที จากนั้นอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะถูกรักษาให้มีค่าคงที่

สาเหตุที่อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นสามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่ออากาศความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถให้ความร้อนแก่เหง้ามันสำปะหลัง และยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ และสาเหตุที่อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มคงที่หลังจากค่าที่กำหนด เนื่องจากการลดความร้อนในส่วนห้องให้ความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่ต้องการ เป็นที่น่าสังเกตว่าเวลาที่ใช้ในการยกระดับอุณหภูมิของเหง้ามันสำปะหลังให้มีค่าตามที่ต้องการมีค่าเท่ากัน สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าจำนวนท่อความร้อนและระบบกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้เพียงพอต่อการนำความร้อนจากห้องเผาไหม้เข้าสู่ส่วนทอรีแฟคชั่น และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35]

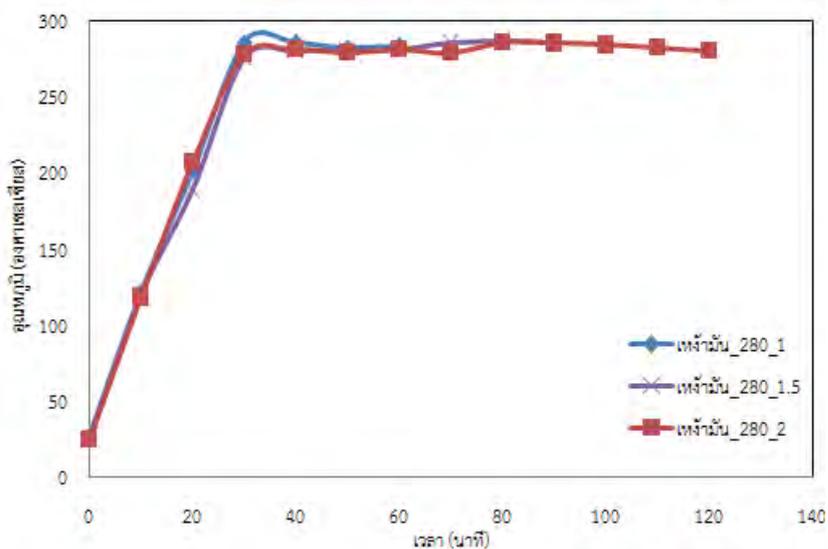
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยต่อความร้อนชนิดต่อกัลความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอริแพคชั่น และสำหรับกรณีเหง้ามันสำปะหลังนั้น จำนวนท่อและครีบกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอริแพคชั่น



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแพคชั่น 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแพคชั่น 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส

4.1.1.2 ลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังสดและเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชัน 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อน และสีน้ำตาลเข้มบ้างเล็กน้อย และเมื่อปิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่ายังคงมีความเหนียวแต่น้อยกว่าเหง้ามันสำปะหลังสด อย่างไรก็ตามที่เวลา 1 ชั่วโมงนี้สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันไม่ดี และการสลายตัวยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังมีสีน้ำตาลเข้มเพิ่มมากขึ้น แต่ยังพบเหง้ามันสำปะหลังที่มีสีน้ำตาลอ่อนในสัดส่วนเท่ากัน และเมื่อปิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่ามีความเปราะเพิ่มขึ้นแต่ยังพบเหง้ามันสำปะหลังที่มีความเหนียวบ้าง แม้ว่าสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มซึ่งพบในพบในชิ้นส่วนที่เป็นตาและข้อของเหง้ามันสำปะหลัง อย่างไรก็ตามที่เวลา 1.5 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังมีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อเมื่อปิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่าความเปราะมาก ดังนั้นที่เวลา 2 ชั่วโมงสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี



รูปที่ 4.4 ลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังไม่แตกต่างจากกรณีอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นไม่ดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังที่มีสีน้ำตาลเข้ม และเมื่อบิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่ามีความเปราะเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และเมื่อบิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่ามีความเปราะมาก ดังนั้นที่เวลา 2 ชั่วโมงสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังไม่แตกต่างจากกรณีอุณหภูมิ 230, 250 องศาเซลเซียส และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นไม่

ดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และเมื่อปีบเหง้ามันสำปะหลังพบว่ามีความเปราะ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะเหง้ามันสำปะหลังที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมดและไม่แตกต่างจากที่เวลา 1.5 ชั่วโมง สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี

สำหรับลักษณะเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชั่นซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]

4.1.1.3 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวล

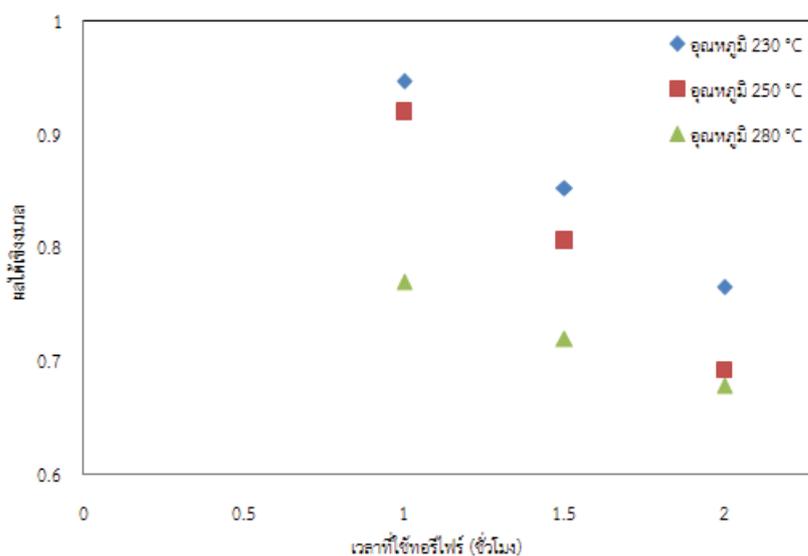
จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้ของมวล ซึ่งนิยามโดยผลหารของมวลแห้งสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นต่อมวลแห้งเริ่มต้น แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (ชั่วโมง) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์รวมกับเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดของส่วนทอรีแฟคชั่นเป็นเวลา 30 นาที

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลได้เชิงมวลลดลง โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ผลได้ของมวลจะมีค่า 0.95, 0.91 และ 0.77 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะพบว่าที่เวลานี้ผลได้เชิงมวลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังต้องการเวลาในการนำความร้อนจากผิวนอกของอนุภาคเข้าไปยังด้านใน ซึ่งในช่วงเวลาการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมงไม่เพียงพอการนำความร้อนเข้าไปจนทำให้เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และจะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์สูงมากทำให้ความร้อนจากผิวนอกของอนุภาคมีค่ามากพอที่จะเข้าไป สลายตัวเหง้ามันสำปะหลังได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของผลได้เชิงมวลสำหรับทุกค่าอุณหภูมิ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีเวลาในการทำปฏิกิริยามากพอที่จะนำความร้อนจากผิวด้านนอกของอนุภาคเข้าสู่ด้านในของอนุภาคเพื่อทำปฏิกิริยาสลายตัว และอัตราการสลายตัวก็จะเป็นไปตามในการสลายตัวของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น นั่นคือเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวที่มีค่าสูงขึ้นตามด้วย ดังนั้นจึงพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชั่น ซึ่งก็คือค่าประมาณ 0.7 จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลมีค่ามากกว่า 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ หรืออีกนัยหนึ่งคือเหง้ามันสำปะหลังส่วนใหญ่ยังไม่สลายตัว และที่เวลา 1.5 ชั่วโมง พบว่าให้ค่าผลได้เชิงมวล 0.72 ซึ่งเป็นค่าที่ดีสำหรับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียสให้ค่าสัดส่วนผลได้เชิงมวล 0.85 และ 0.80 ตามลำดับ จะพบว่าค่าเหล่านี้ยังสูงอยู่และสะท้อนให้เห็นการสลายตัวที่ไม่ทั่วถึงทั้งอนุภาค สำหรับที่เวลา 2 ชั่วโมง จะพบว่า

อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ให้ค่าผลได้เชิงมวล 0.76, 0.69 และ 0.68 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิของเหง้ามันสำปะหลัง

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อเวลาในการทอรีไพร์มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ผลได้เชิงมวลจะมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการสลายตัวของเหง้ามันสำปะหลังเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ[38] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของเหง้ามันสำปะหลังเพื่อใช้กำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไพร์ โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีที่สุดสำหรับการทอรีไพร์ที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไพร์คือ 2 ชั่วโมง และสำหรับการทอรีไพร์ ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไพร์คือ 1.5 และ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีไพร์ที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง

4.1.1.4 ผลของเวลาในการทอรีไพร์ที่มีต่อค่าความร้อน

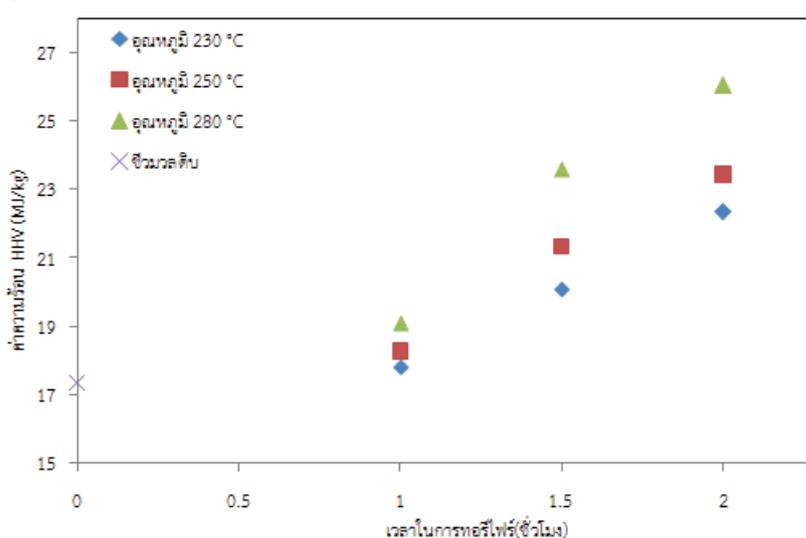
จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีไพร์ที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไพร์ (ชั่วโมง)

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไพร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับเหง้ามันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอรีไพร์ 1 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจะมีค่า 17.78 และ 18.26 MJ/kg จะพบว่าที่เวลานี้ค่าความร้อนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราการสลายตัวของเหง้ามันสำปะหลังที่เวลาและอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงทำให้ค่าความร้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย สำหรับที่อุณหภูมิ 250

และ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าความร้อนจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังเกิดการสลายตัวยิ่งมากขึ้น

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง เหง้ามันสำปะหลังให้ค่าความร้อน 17.80 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 20.01 และ 22.34 MJ/kg ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง เหง้ามันสำปะหลังให้ค่าความร้อน 18.26 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 21.33 และ 23.43 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (19.09, 23.60 และ 26.03 MJ/kg ตามลำดับ) จะพบว่าเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้น ค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่าความร้อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นตาม อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้น คิดเป็น 2.6 – 28.7 %, 5.2 – 35.0 % และ 10.0 – 50.0 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังดิบ

ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้น จะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังหลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าว กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในเหง้ามันสำปะหลังได้แก่เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในขณะที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน[40, 41, 42] และเหง้ามันสำปะหลังที่ถูกเผาไหม้ คาร์บอนจะทำหน้าที่คายความร้อน ในขณะที่ออกซิเจนจะทำหน้าที่ดูดความร้อน ทำให้สัดส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย [43]



รูปที่ 4.6 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง

4.1.1.5 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น

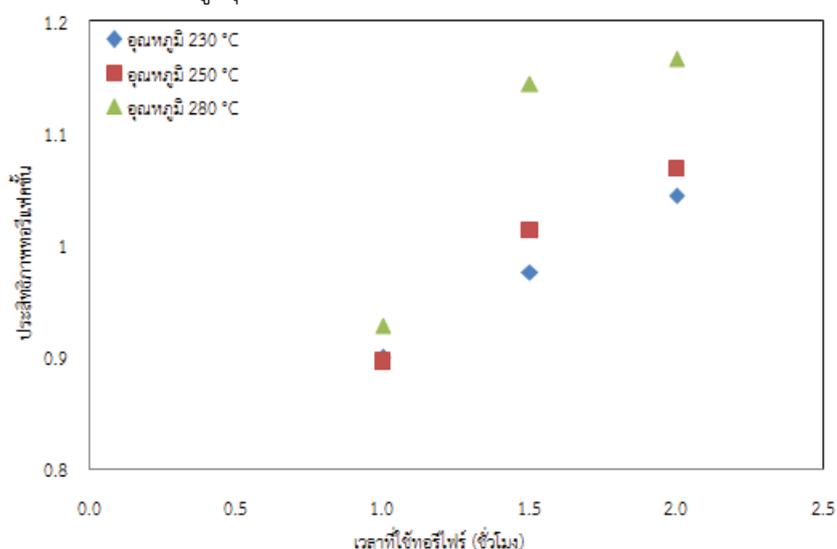
สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น เป็นการชี้วัดอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ เพื่อใช้ในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยพิจารณาเลือกจากอุณหภูมิและเวลาที่ให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุด

รูปที่ 4.7 แสดงผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นต่อผลรวมของค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังเริ่มต้นกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น และแกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่น จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับเหง้ามันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่า 0.899, 0.896 และ 0.928 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะพบว่าที่เวลานี้มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นสูงขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงนั้นพบว่าย่างเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกด้วย สำหรับที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของเหง้ามันสำปะหลังเท่ากับ 0.899 และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.976 และ 1.045 ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของเหง้ามันสำปะหลังเท่ากับ 0.896 และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.013 และ 1.068 ตามลำดับ ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของเหง้ามันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (0.928, 1.144 และ 1.167 ตามลำดับ) จะพบว่าเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของเหง้ามันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งหมายความว่าเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นจะมีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเทียบกับเหง้ามันสำปะหลังดิบ และจะพบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีค่าต่ำกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเวลาที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชั่นสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง จะพบว่าเวลาในการทอรีแฟคชั่น 2 ชั่วโมง

เหมาะสมที่สุด ในขณะที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 และ 1 ชั่วโมงมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมงจะให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.167 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับเหง้ามันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 16.7 %



รูปที่ 4.7 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง

4.1.1.6 สรุปเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับเหง้ามันสำปะหลัง

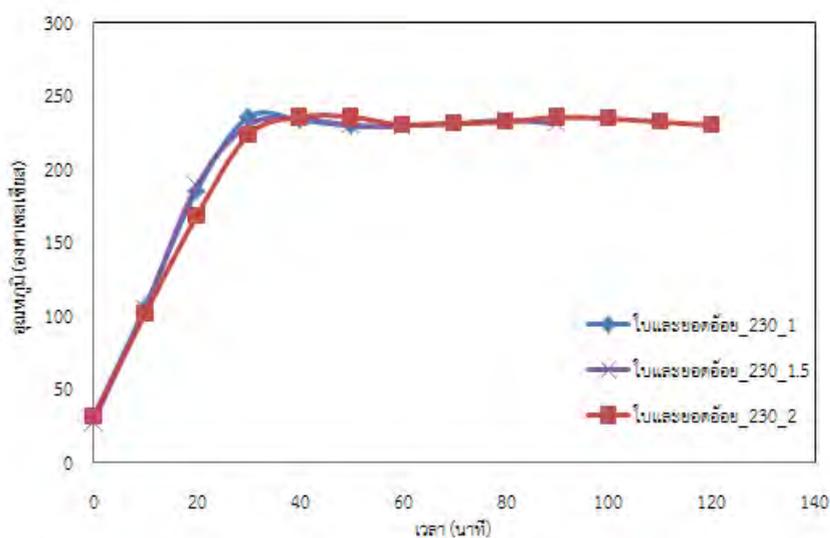
สำหรับเหง้ามันสำปะหลัง เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์ โดยพิจารณาลักษณะสี และผลได้เชิงมวลจะพบว่า สำหรับเหง้ามันสำปะหลังนั้น อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 2 ชั่วโมง และสำหรับการทอรีไฟร์ ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1.5 และ 2 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน จะพบว่าอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 2 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอ และความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงในการทอรีไฟร์สำหรับเหง้ามันสำปะหลังจะพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์คือ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุด ผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.68 ค่าความร้อนเท่ากับ 26.03 MJ/kg และประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.167 นั่นคือสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับเหง้ามันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 16.7 %

4.1.2 กรณีใบและยอดอ้อย

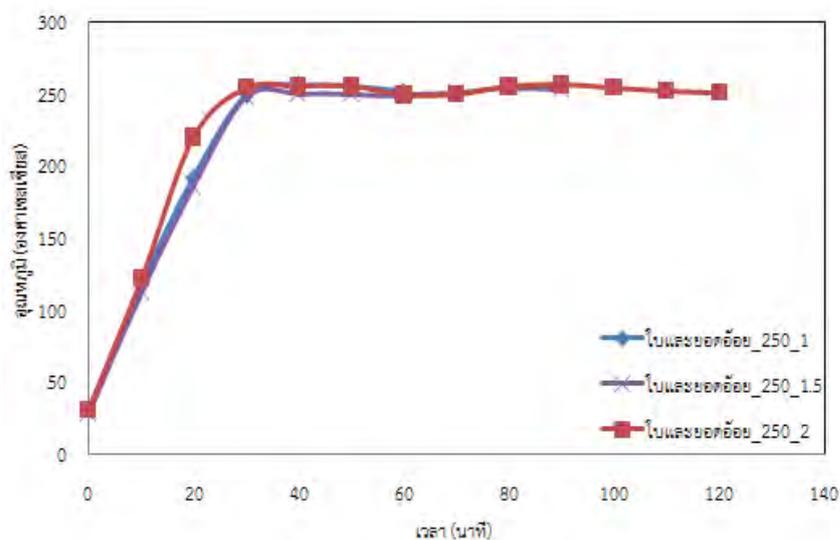
4.1.2.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.8 - 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับใบและยอดอ้อย ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ และข้อมูลในแต่ละกราฟจะแสดงเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่ 60, 90 และ 120 นาที จากรูปจะพบว่า สำหรับทุกอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นและทุกเวลาในการทอรีแฟคชั่นนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่ออวกาศความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถให้ความร้อนแก่ใบและยอดอ้อย และยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ และเมื่อถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะถูกรักษาให้มีค่าคงที่และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่ต้องการ เมื่อกำหนดอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่ออนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่ออนาที) [34] [35]

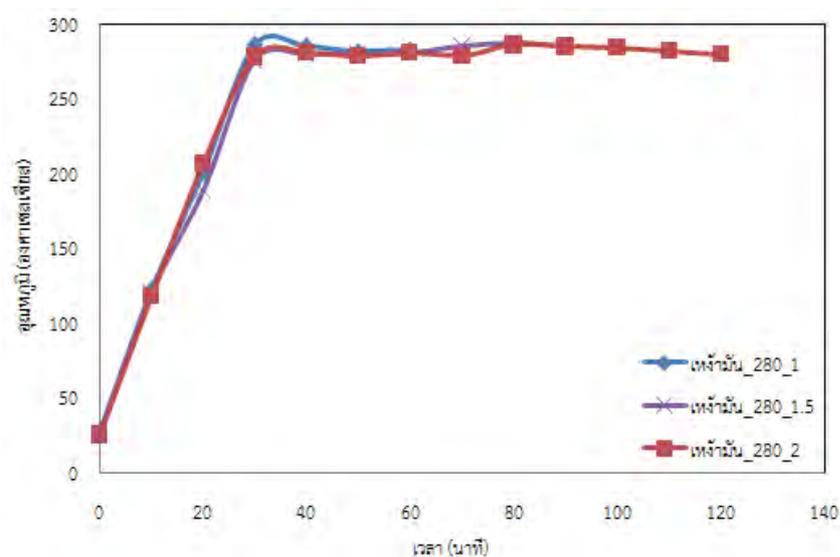
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่ออวกาศความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชั่นและสำหรับกรณีใบและยอดอ้อยนั้น จำนวนท่อและครีบกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่น



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส

4.1.2.2 ลักษณะของใบและยอดอ้อยเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของใบและยอดอ้อยสดและใบและยอดอ้อยที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของใบและยอดอ้อยจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าพบว่ามีลักษณะใบและยอดอ้อยส่วน

ใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อน มีใบและยอดอ้อยสีน้ำตาลเข้มบ้างเล็กน้อย และเมื่อบีบพบว่าใบและอ้อยแตกร่วนดี อย่างไรก็ตามที่เวลา 1 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันไม่ดีและการสลายตัวยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยทั้งหมดมีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อบีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตกร่วนมาก ที่เวลา 1.5 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตกร่วนมาก ที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดีเช่นกัน



รูปที่ 4.11 ลักษณะของใบและยอดอ้อยเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่เวลาต่างๆ

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชันมีค่าเพิ่มขึ้นสีของใบและยอดอ้อยจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยไม่แตกต่าง

จากกรณีอุณหภูมิต่ำ 230 องศาเซลเซียส จึงสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นไม่ดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อปีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตก่วนดี สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อปีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตก่วนดีมาก ที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดีเช่นกัน

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นสีของใบและยอดอ้อยจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยมีสีเข้มทั้งหมด และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อปีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตก่วนดี สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และไม่แตกต่างจากที่เวลา 1.5 ชั่วโมงสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี

สำหรับลักษณะใบและยอดอ้อยจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชั่นซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]

4.1.2.3 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวล

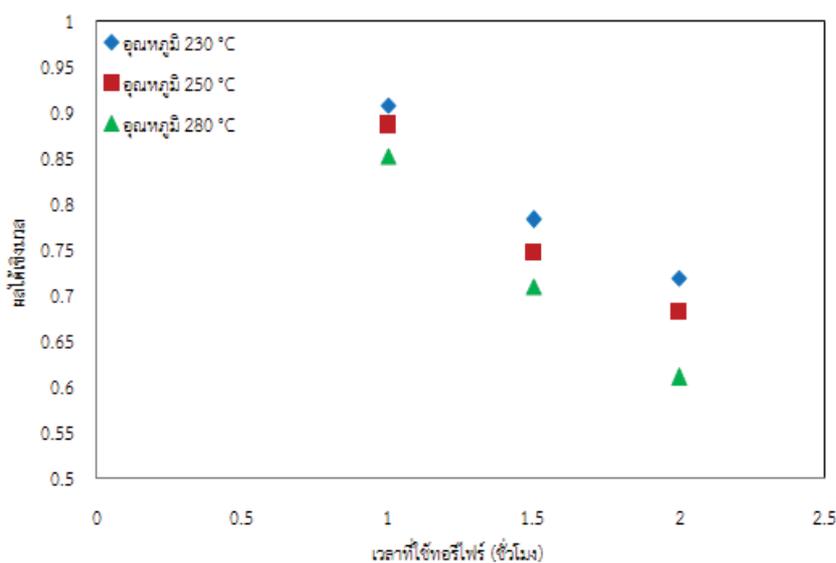
จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับใบและยอดอ้อย จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล ซึ่งนิยามโดยผลหารของมวลแห้งสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นต่อมวลแห้งเริ่มต้น แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่น (ชั่วโมง) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่นคือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์รวมกับเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดของส่วนทอรีแฟคชั่นเป็นเวลา 30 นาที

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลได้เชิงมวลลดลง โดยที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลจะมีค่า 0.91, 0.89 และ 0.85 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เวลาในการทอรีแฟคชั่นสูงขึ้น 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของสัดส่วนผลได้เชิงมวลสำหรับทุกค่าอุณหภูมิ เนื่องจากการกระจายความร้อนทำได้ดีจนการทำปฏิกิริยามีความสม่ำเสมอทั่วถึง และความหนาแน่นของใบและยอดอ้อยมีค่าน้อย ทำให้การนำความร้อนจากผิวนอกเข้าสู่ด้านในของใบและยอดอ้อยได้ดีด้วย ดังนั้นจึงพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น ซึ่งก็คือค่าประมาณ 0.7 จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลมีค่าเท่ากับมากกว่า 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ หรืออีกนัยหนึ่งคือใบและยอดอ้อยส่วนใหญ่ยังไม่สลายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และที่เวลา 1.5 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าให้ค่าผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.75 และ 0.71 ซึ่งเป็นค่าที่ดี ในขณะที่อุณหภูมิ 230 ให้ค่าผลได้เชิงมวล 0.78 และ 0.75 ตามลำดับ จะพบว่าค่าผลได้เชิงมวลค่อนข้างยังสูงอยู่และสะท้อนให้เห็นการสลายตัวที่ไม่ทั่วถึง

ทั้งอนุภาค สำหรับที่เวลา 2 ชั่วโมงจะพบว่า อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ให้ค่าผลได้เชิงมวล 0.72, 0.68 และ 0.62 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวที่สม่ำเสมอทั่วตลอดทั้งอนุภาคใบและยอดอ้อย

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ผลได้เชิงมวลจะมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการสลายตัวของใบและยอดอ้อยเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วอนุภาค[38] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของใบและยอดอ้อย เพื่อใช้กำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชัน โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชันที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 2 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับใบและยอดอ้อย

4.1.2.4 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อน

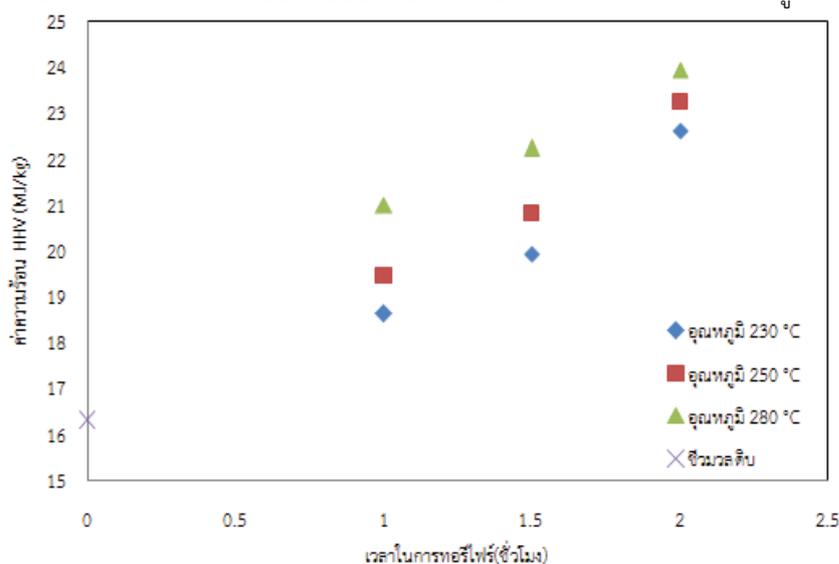
จากรูปที่ 4.13 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับใบและยอดอ้อย จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (ชั่วโมง)

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับใบและยอดอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่าเท่ากับ 18.62, 19.45 และ 21.01 MJ/kg จะพบว่าที่เวลานี้ค่าความร้อนความแตกต่างกันน้อยมีนัยสำคัญ สำหรับที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าความร้อนจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

เนื่องจากความหนาแน่นของไบและยอดอ้อยมีค่าน้อย ทำให้อัตราการสลายตัวของไบและยอดอ้อยเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ไบและยอดอ้อยให้ค่าความร้อน 18.62 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 19.94 และ 22.62 MJ/kg ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ไบและยอดอ้อยให้ค่าความร้อน 19.45 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 20.82 และ 23.25 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (21.00, 22.22 และ 23.93 MJ/kg ตามลำดับ) จะพบว่าเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชันมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่าความร้อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามเวลาการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น คิดเป็น 14.2 - 38.7 %, 19.3 - 42.6 % และ 28.8 - 46.8 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยดิบ

ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชัน จะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยจากผ่านกระบวนการดังกล่าว กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในไบและยอดอ้อยได้แก่ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชันเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในขณะที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน[40, 41, 42] และไบและยอดอ้อยที่ถูกทอรีไฟร์ คาร์บอนจะทำหน้าที่คายความร้อน ในขณะที่ออกซิเจนจะทำหน้าที่ดูดความร้อน ทำให้สัดส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย [43]



รูปที่ 4.13 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับไบและยอดอ้อย

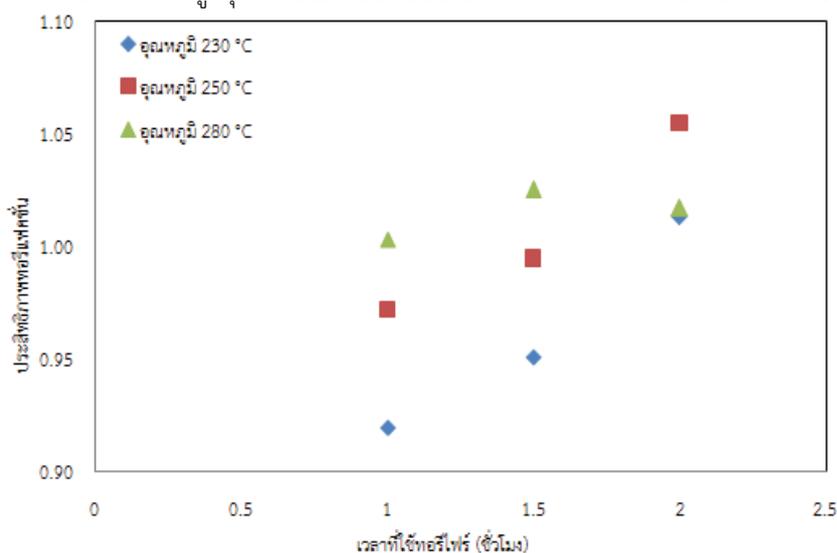
4.1.2.5 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.14 แสดงผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับไบและยอตอ้อย จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของไบและยอตอ้อยที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นต่อผลรวมของค่าความร้อนของไบและยอตอ้อยดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และแกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่น

จากรูปจะพบว่าสำหรับอุณหภูมิตั้งที่ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับไบและยอตอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่า 0.919, 0.972 และ 1.003 สำหรับอุณหภูมิตั้งที่ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะพบว่าที่เวลานี้มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของไบและยอตอ้อยที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงพบว่าค่อยข้างเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิตั้งที่ 230 และ 250 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ที่สำหรับอุณหภูมิตั้งที่ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่จะพบแนวโน้มการลดลงช่วงเวลาดังกล่าว

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิตั้งที่ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของไบและยอตอ้อยเท่ากับ 0.919 และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.950 และ 1.013 ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของไบและยอตอ้อยเท่ากับ 0.972 และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.994 และ 1.054 ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิตั้งที่ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของไบและยอตอ้อยจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยมีค่าเท่ากับ 1.003 และ 1.025 ตามลำดับ และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นของไบและยอตอ้อยจะลดลงเท่ากับ 1.017 เมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นหลังจาก 1.5 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของไบและยอตอ้อยที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1.5 ชั่วโมง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2 ชั่วโมงสูงกว่า 1.5 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มลดลง และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งหมายความว่าเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นจะมีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเทียบกับเหง้ามันสำปะหลังดิบ และจะพบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีค่าต่ำกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาหาจุดที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชั่นสำหรับใบและยอดอ้อย โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับใบและยอดอ้อย จะพบว่าเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด จะให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุดเท่ากับ 1.054 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดในใบและยอดอ้อยที่ผ่านการทอรีไฟร์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 5.4 %



รูปที่ 4.14 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับใบและยอดอ้อย

4.1.2.6 สรุปเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับใบและยอดอ้อย

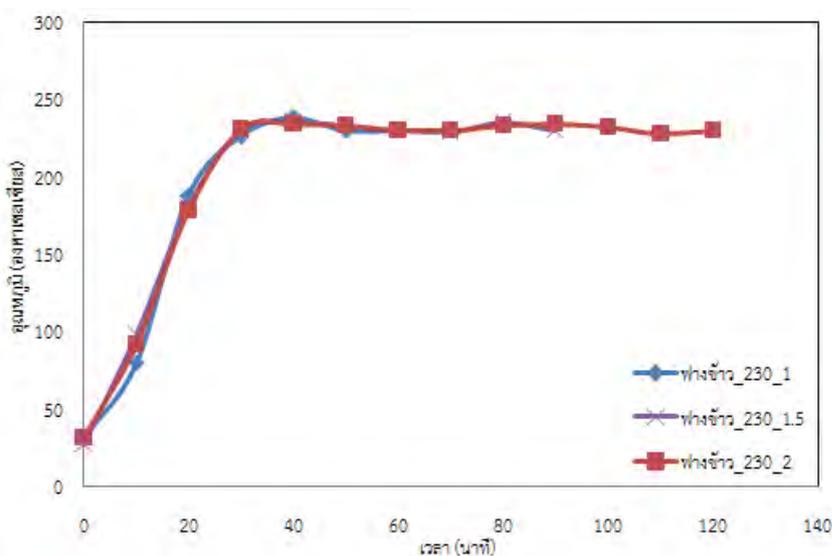
สำหรับใบและยอดอ้อย เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์ในเตาปฏิกรณ์ โดยการพิจารณาลักษณะสี และผลได้เชิงมวล จะพบว่าสำหรับใบและยอดอ้อยนั้น สำหรับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง สำหรับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมคือ 1.5 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น จะพบว่าสำหรับใบและยอดอ้อยนั้น สำหรับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง สำหรับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมคือ 1.5 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอ และความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงในการทอรีไฟร์สำหรับใบและยอดอ้อยจะพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์คือ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุด ผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.68 ค่าความร้อนเท่ากับ 23.25 MJ/kg และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุดเท่ากับ 1.054 นั่นคือสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับใบและยอดอ้อยที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 5.4 %

4.1.3 กรณีฟางข้าว

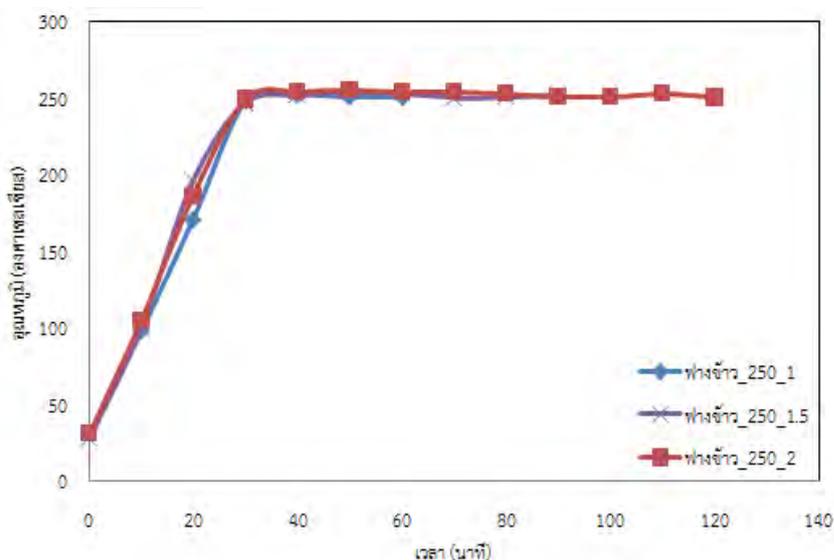
4.1.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.15 - 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับฟางข้าว ที่กำหนดอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ และข้อมูลในแต่ละกราฟจะแสดงเวลาในการทอรีแฟคชั่น 60, 90 และ 120 นาที จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และทุกเวลาในการทอรีแฟคชั่นนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่ออวกาศความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถให้ความร้อนแก่ฟางข้าว และถูกยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการภายในเวลา 30 นาที จากนั้นอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะถูกรักษาและควบคุมให้มีค่าคงที่ตามค่าที่ต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35]

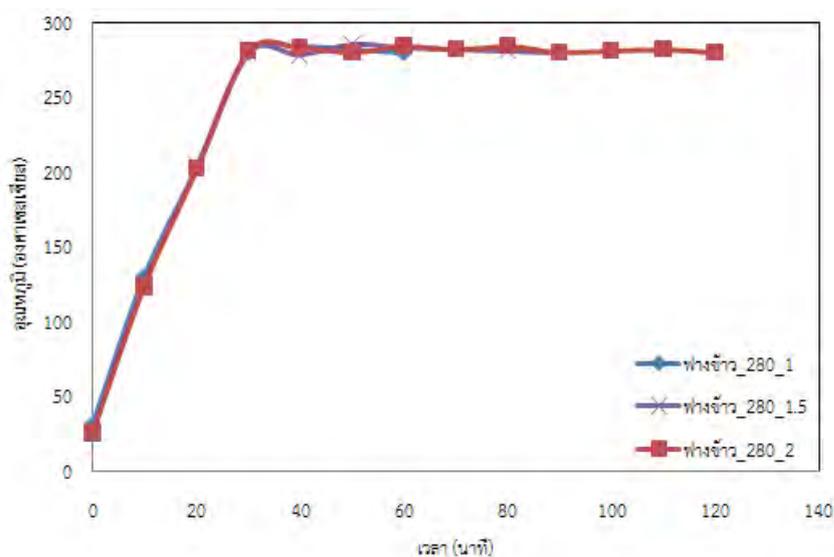
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่ออวกาศความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชั่นและสำหรับกรณีฟางข้าวนี้ จำนวนท่อและครีบกกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่น



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 250 องศาเซลเซียส



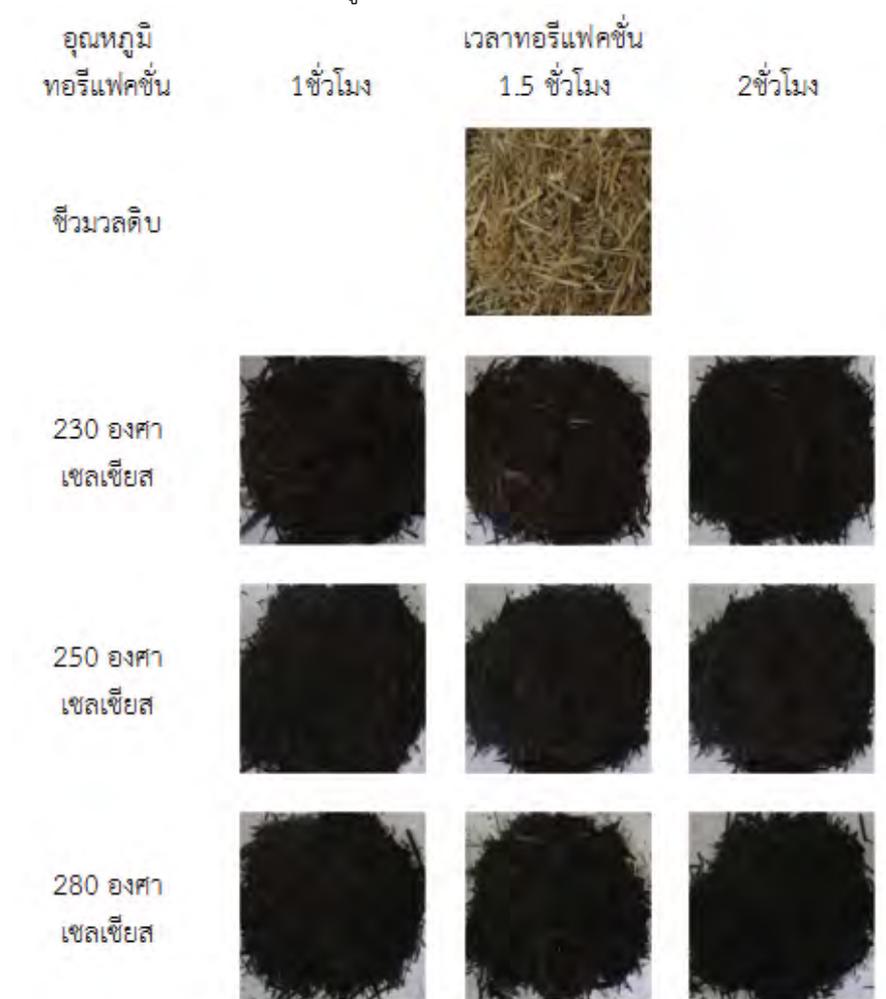
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 280 องศาเซลเซียส

4.1.3.2 ลักษณะของฟางข้าวเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของฟางข้าวสดและฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการทอรีแพคชั้นที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแพคชั้น 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 230 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของฟางข้าวจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าพบว่ามีสีน้ำตาลเกือบเข้ม

เป็นส่วนใหญ่ สรุปได้ว่ามีความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นค่อนข้างดี และการสลายตัวยังเกิดขึ้นค่อนข้างสมบูรณ์ ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อบีบพบว่าฟางข้าวมีความเปราะ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าฟางข้าวมีความเปราะมาก ที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี



รูปที่ 4.18 ลักษณะของฟางข้าวเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มสูงขึ้นสีของลักษณะฟางข้าวจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าฟางข้าวไม่แตกต่างจากกรณีอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อบีบพบว่าฟางข้าวมีความเปราะ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอ

รีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่า เหง้ามันสำปะหลังมีความเปราะมาก ที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นสีของฟางข้าวจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวไม่แตกต่างจากกรณีอุณหภูมิ 230, 250 องศาเซลเซียส และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าฟางข้าวมีความเปราะ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และไม่แตกต่างจาก ที่เวลา 1.5 ชั่วโมง สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี

สำหรับลักษณะฟางข้าวจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชั่นซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]

4.1.3.3 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวล

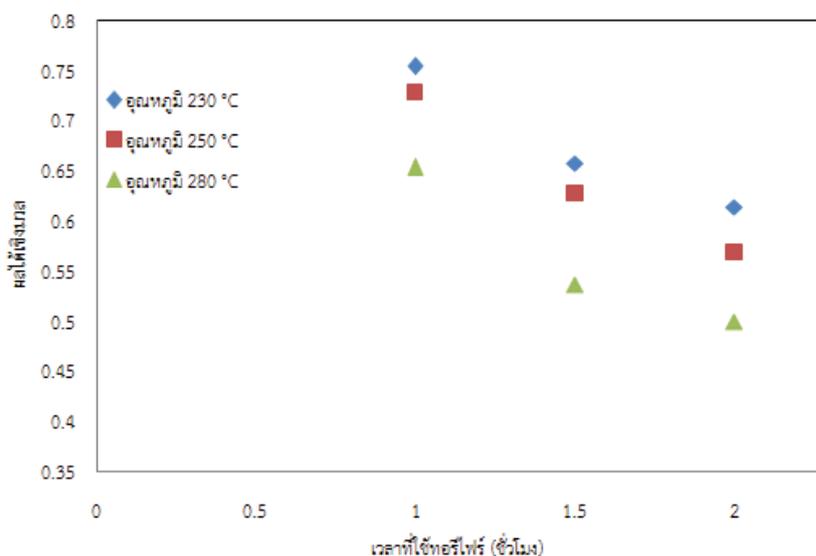
จากรูปที่ 4.19 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับฟางข้าว จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล ซึ่งนิยามโดยผลหารของมวลแห้งสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นต่อมวลแห้งเริ่มต้น แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (ชั่วโมง) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์รวมกับเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดของส่วนทอรีแฟคชั่นเป็นเวลา 30 นาที

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลได้เชิงมวลลดลง โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลจะมีค่า 0.75, 0.73 และ 0.65 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะพบว่าที่เวลานี้ผลได้เชิงมวลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชั่น ซึ่งก็คือค่าประมาณ 0.7 จะพบว่าที่ที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ผลได้ของมวลจะมีค่า 0.75 และ 0.73 ซึ่งใกล้เคียงกับ 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพการสลายตัวที่สมบูรณ์อย่างสม่ำเสมอและให้ค่าผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชั่น สำหรับที่เวลา 2 ชั่วโมง จะพบว่าอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสให้ค่าผลได้เชิงมวล 0.61, 0.57 และ 0.5 ตามลำดับ

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ผลได้เชิงมวลจะมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการสลายตัวของฟางข้าวเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วอนุภาค[38] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของฟางข้าว เพื่อใช้กำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชั่น โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชั่นที่

มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีไฟร์ที่ต่อผลได้เชิงมวลสำหรับฟางข้าว

4.1.3.4 ผลของเวลาในการทอรีไฟร์ที่ต่อค่าความร้อน

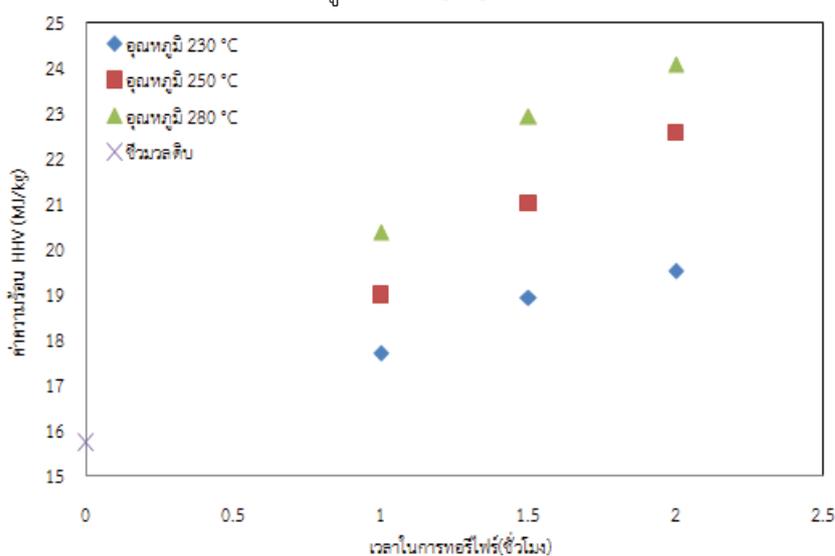
จากรูปที่ 4.20 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีไฟร์ที่ต่อค่าความร้อนสำหรับฟางข้าว จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (ชั่วโมง)

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับฟางข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่าเท่ากับ 18.62, 19.45 และ 21.01 MJ/kg จะพบว่าที่เวลานี้ค่าความร้อนความแตกต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ ส่วนที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าความร้อนจะมีความแตกต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญเช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอัตราการสลายตัวของฟางข้าวทำการสลายตัวได้ดี เนื่องจากความหนาแน่นของฟางข้าวมีค่าน้อย ทำให้อัตราการสลายตัวทางโครงสร้างองค์ประกอบของฟางข้าวเกิดขึ้นได้ดีมากยิ่งขึ้น

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ฟางข้าวให้ค่าความร้อน 18.62 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 19.94 และ 22.62 MJ/kg ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง เหน้จ้ำมันสำปะให้ค่าความร้อน 19.45 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 20.82 และ 23.25 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจะ

เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (21.00, 22.22 และ 23.93 MJ/kg ตามลำดับ) จะพบว่าเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชันมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่าความร้อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับ อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามเวลาการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น คิดเป็น 12.5 - 24.1 %, 20.7 - 43.4 % และ 29.5 - 53.0 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของฟางข้าวดิบ

ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชัน จะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของฟางข้าวจากผ่านกระบวนการดังกล่าว กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของฟางข้าวมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในฟางข้าวได้แก่ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชันเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในขณะที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน[40, 41, 42] และฟางข้าวที่ถูกทอรีไฟร์ คาร์บอนจะทำหน้าที่คายความร้อน ในขณะที่ออกซิเจนจะทำหน้าที่ดูดความร้อน ทำให้สัดส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย [43]



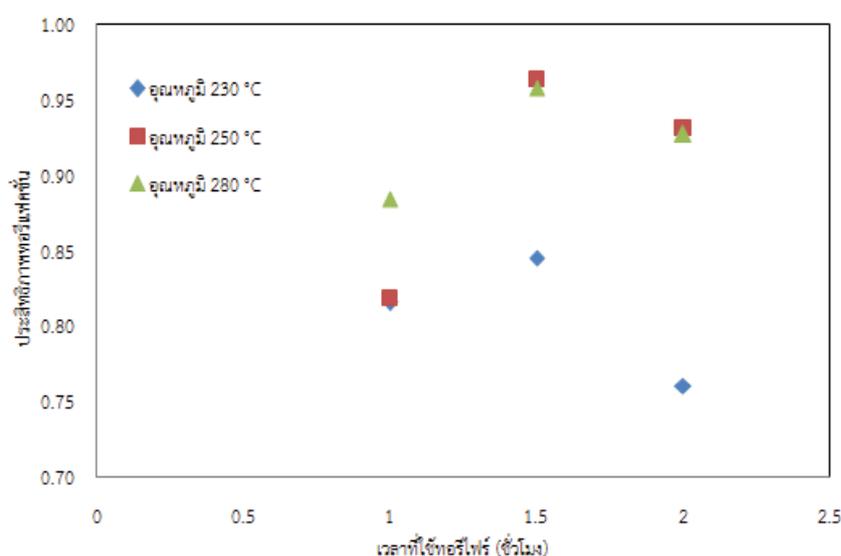
รูปที่ 4.20 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับฟางข้าว

4.1.3.5 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน

รูปที่ 4.21 แสดงผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าว จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของฟางข้าวที่ผ่านจากการทอรีแฟคชันต่อผลรวมของค่าความร้อนของฟางข้าวดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และแกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชัน

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือที่เวลาในการทอ

รีไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะมีค่า 0.816, 0.818 และ 0.884 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะพบว่าที่เวลานี้มีประสิทธิภาพทอริแฟคชันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของฟางข้าวที่ผ่านจากการทอรีไฟร์สูงมากขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงพบว่าค่อยข้างเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอริแฟคชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพทอริแฟคชันของฟางข้าวจะมีค่าสูงสุดที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 ชั่วโมง และจะลดลงที่ในช่วงเวลาหลังจาก 1.5 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของฟางข้าวที่ผ่านจากการทอรีไฟร์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่เวลาในการทอริแฟคชัน 1.5 ชั่วโมง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เวลาในการทอริแฟคชัน 2 ชั่วโมงสูงกว่า 1.5 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอริแฟคชันมีแนวโน้มลดลง สำหรับทั้งที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชันสำหรับฟางข้าว

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอริแฟคชันของฟางข้าวเท่ากับ 0.816 และเมื่อเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.846 ส่วนที่เวลาในการทอริแฟคชันเป็น 2 ชั่วโมงประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะลดลงเหลือเพียง 0.761 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอริแฟคชันของฟางข้าวเท่ากับ 0.818 และเมื่อเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.963 และที่เวลาในการทอริแฟคชันเป็น 2 ชั่วโมงประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะลดลงเหลือเพียง 0.931 สำหรับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพทอริแฟคชันของฟางข้าวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับอุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส (0.884, 0.958 และ 0.927 ตามลำดับ) และประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของฟางข้าวที่ผ่านจากการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง ในทาง

ตรงกันข้ามประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะต่ำกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของฟางข้าวที่ผ่านจากการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเวลาที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชั่นสำหรับฟางข้าว โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับฟางข้าว จะพบว่าเวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุดในขณะที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 และ 1 ชั่วโมงมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟางข้าว ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุด จะให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุดเท่ากับ 0.963 แสดงว่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานต่ำสุดในฟางข้าวที่ผ่านการทอรีไฟร์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 3.7 %

4.1.3.6 สรุปเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับฟางข้าว

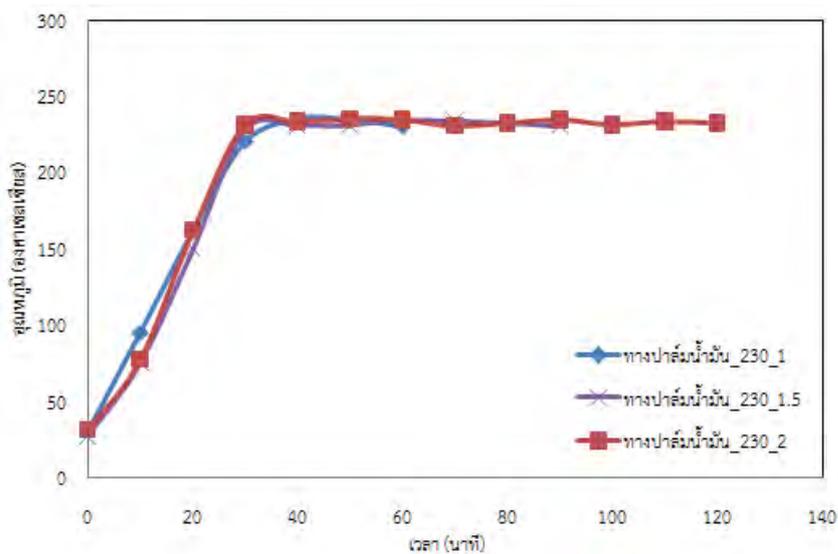
สำหรับฟางข้าว เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์ โดยการพิจารณาลักษณะสี และผลได้เชิงมวลจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น จะพบว่าอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ ชั่วโมง 1.5 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอ และความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงในการทอรีไฟร์สำหรับฟางข้าวจะพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมคือ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 01.5 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุด ผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.63 ค่าความร้อนเท่ากับ 21.00 MJ/kg และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุดเท่ากับ 0.963 แสดงว่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานต่ำสุดในฟางข้าวที่ผ่านการทอรีไฟร์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 3.7 %

4.1.4 กรณีทางปาล์มน้ำมัน

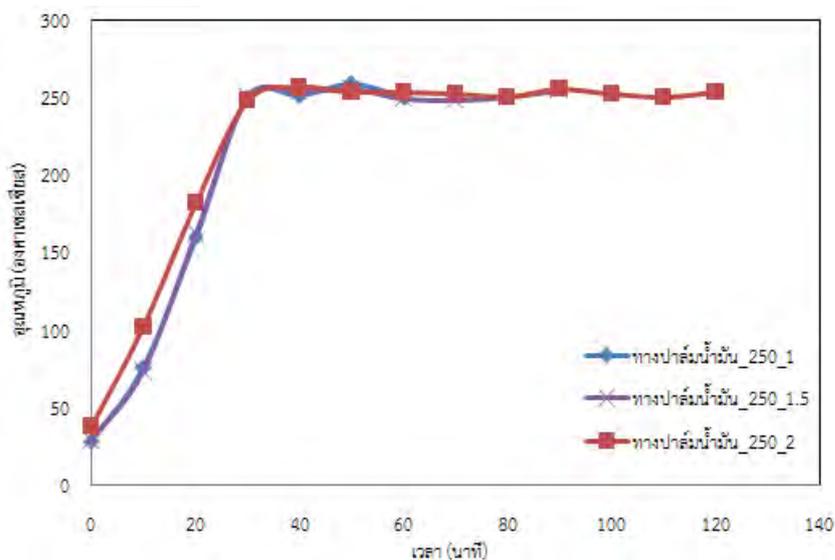
4.1.4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.22 - 4.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับทางปาล์มน้ำมัน ที่กำหนดอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ และข้อมูลในแต่ละกราฟจะแสดงเวลาในการทอรีแฟคชั่น 60, 90 และ 120 นาที จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และทุกเวลาในการทอรีแฟคชั่นนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่อถักความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถให้ความร้อนแก่ทางปาล์มน้ำมัน และถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที จากนั้นอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะถูกรักษาให้มีค่าคงที่ด้วยการลดความร้อนในส่วนห้องให้ความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่ต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35]

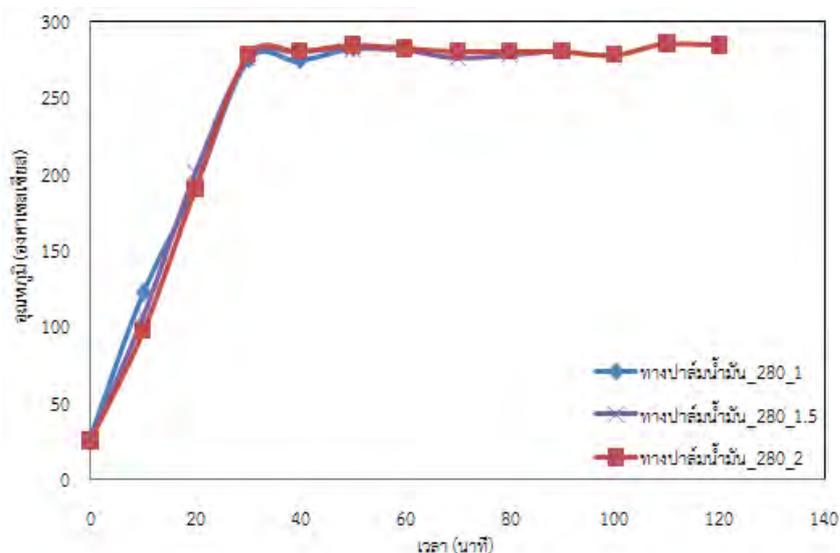
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่ออากาศความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชัน และสำหรับกรณีทางปาล์มน้ำมันนั้น จำนวนท่อและครีบกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชัน



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส

4.1.4.2 ลักษณะของทางปาล์มน้ำมันเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.25 แสดงลักษณะของทางปาล์มน้ำมันสดและทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าทางปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อน และทางปาล์มน้ำมันสีน้ำตาลเข้มบ้างเล็กน้อย และเมื่อบีบพบว่าทางปาล์มน้ำมันยังคงมีความเหนียว แต่น้อยกว่าทางปาล์มน้ำมันสด อย่างไรก็ตามที่เวลา 1 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นไม่ดี และการสลายตัวยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มเพิ่มมากขึ้น แต่ยังพบทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลอ่อนในสัดส่วนเท่ากัน เมื่อบีบพบว่าทางปาล์มน้ำมันมีความเปราะเพิ่มขึ้น แต่ยังพบทางปาล์มน้ำมันที่มีความเหนียวบ้าง ที่เวลา 1.5 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับไม่ดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มเพิ่มมากขึ้น แต่ยังไม่เป็นสีน้ำตาลเข้ม เมื่อบีบพบว่าทางปาล์มน้ำมันมีความเปราะมากขึ้น ที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับไม่ดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 และ 1.5 ชั่วโมงพบว่าทางปาล์มน้ำมันไม่แตกต่างจากกรณีอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับไม่ดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มเกือบทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าทาง

ปาล์มน้ำมันมีความเปราะมากขึ้น ที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดีพอใช้



รูปที่ 4.25 ลักษณะของปาล์มน้ำมันเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่เวลาต่างๆ

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันไม่แตกต่างจากกรณีอุณหภูมิ 230, 250 องศาเซลเซียส และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันไม่ดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าทางปาล์มน้ำมันมีความเปราะ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมง

พบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันหลังที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมดและไม่แตกต่างจากที่เวลา 1.5 ชั่วโมง สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

สำหรับลักษณะทางปาล์มน้ำมันจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชันซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]

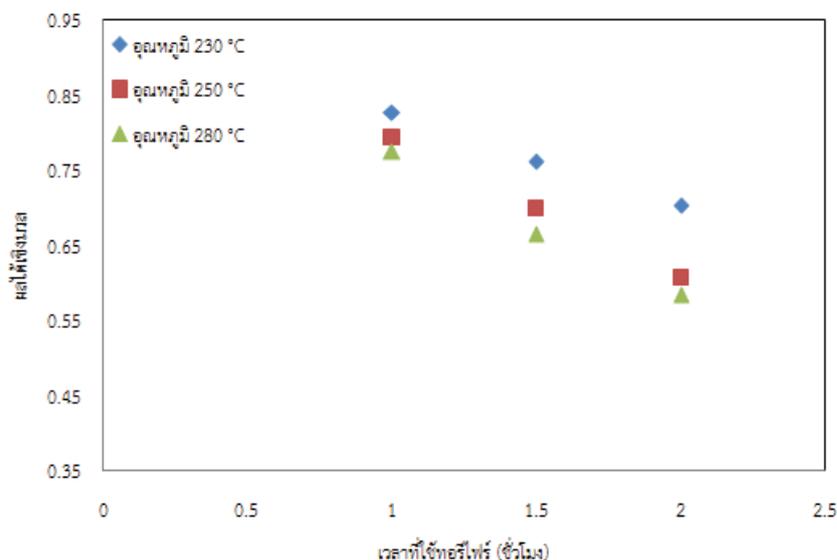
4.1.4.3 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวล

จากรูปที่ 4.26 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล ซึ่งนิยามโดยผลหารของมวลแห้งสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันต่อมวลแห้งเริ่มต้น แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (ชั่วโมง) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์รวมกับเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดของส่วนทอรีแฟคชันเป็นเวลา 30 นาที

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลได้เชิงมวลลดลง โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลจะมีค่า 0.83, 0.80 และ 0.78 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เวลาในการทอรีไฟร์สูงขึ้น 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของสัดส่วนผลได้เชิงมวลสำหรับทุกค่าอุณหภูมิ ดังนั้นจึงพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลได้เชิงมวลที่ดีที่สุดสำหรับการทอรีแฟคชัน ซึ่งก็คือค่าประมาณ 0.7 จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลมีค่ามากกว่า 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ หรืออีกนัยหนึ่งคือปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่ยังไม่สลายตัว แต่ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลมีค่าเท่ากับ 0.78 สำหรับอุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1.5 ชั่วโมง พบว่าให้ค่าผลได้เชิงมวล 0.76 และ 0.70 ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ดี แสดงให้เห็นว่าที่เวลา 1.5 ชั่วโมงทั้งสองอุณหภูมิมีสภาพการสลายตัวที่ดี จะพบว่าค่าเหล่านี้ยังสูงอยู่และสะท้อนให้เห็นการสลายตัวที่ไม่ทั่วถึงทั้งอนุภาค สำหรับที่เวลา 2 ชั่วโมง จะพบว่าอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ให้ค่าผลได้เชิงมวล 0.70, 0.61 และ 0.58 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวที่สม่ำเสมอทั่วอนุภาคของปาล์มน้ำมัน

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ผลได้เชิงมวลจะมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการสลายตัวของทางปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วอนุภาค [38] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของทางปาล์มน้ำมัน เพื่อใช้กำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชัน โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีที่สุดสำหรับการทอรีแฟคชันที่มีค่าประมาณ 0.7 [19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 2 ชั่วโมง และสำหรับการทอรีไฟร์ ที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.26 ผลของเวลาในกระบวนการทอริแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับทางปาล์มน้ำมัน

4.1.4.4 ผลของเวลาในการทอริแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อน

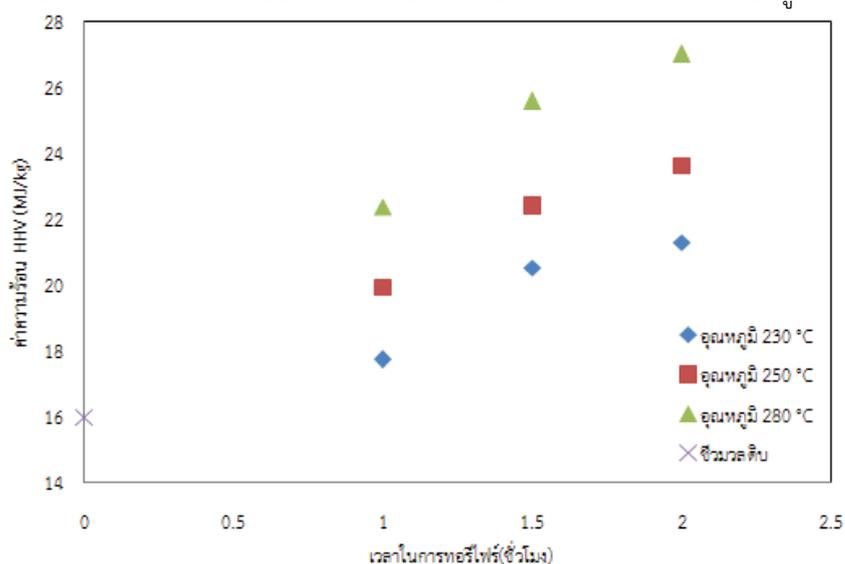
จากรูปที่ 4.27 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอริแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอริไฟร์ (ชั่วโมง)

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอริไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอริไฟร์ 1 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่าเท่ากับ 17.73, 19.91 และ 22.38 MJ/kg จะพบว่าที่เวลานี้ ค่าความร้อนความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอริไฟร์ 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าความร้อนจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน เนื่องจากอัตราการสลายตัวของทางปาล์มน้ำมันสลายตัวได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิการทอริแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอริไฟร์ 1 ชั่วโมง ทางปาล์มน้ำมันให้ค่าความร้อน 17.73 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 20.51 และ 21.28 MJ/kg ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอริไฟร์ 1 ชั่วโมง ทางปาล์มน้ำมันให้ค่าความร้อน 19.91 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 22.40 และ 23.61 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (22.38, 25.57 และ 27.01 MJ/kg ตามลำดับ) จะพบว่าเมื่อเวลาในการทอริแฟคชันมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่าความร้อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับ

อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามเวลาการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นคิดเป็น 11.1 - 33.3 %, 24.7 - 47.9 % และ 40.2 - 69.2 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันดิบ

ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชัน จะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันจากผ่านกระบวนการดังกล่าว กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในทางปาล์มน้ำมันได้แก่ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชันเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในขณะที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน[40, 41, 42] และทางปาล์มน้ำมันที่ถูกทอรีไฟร์ คาร์บอนจะทำหน้าที่คายความร้อน ในขณะที่ออกซิเจนจะทำหน้าที่ดูดความร้อน ทำให้สัดส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย [43]



รูปที่ 4.27 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมัน

4.1.4.5 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน

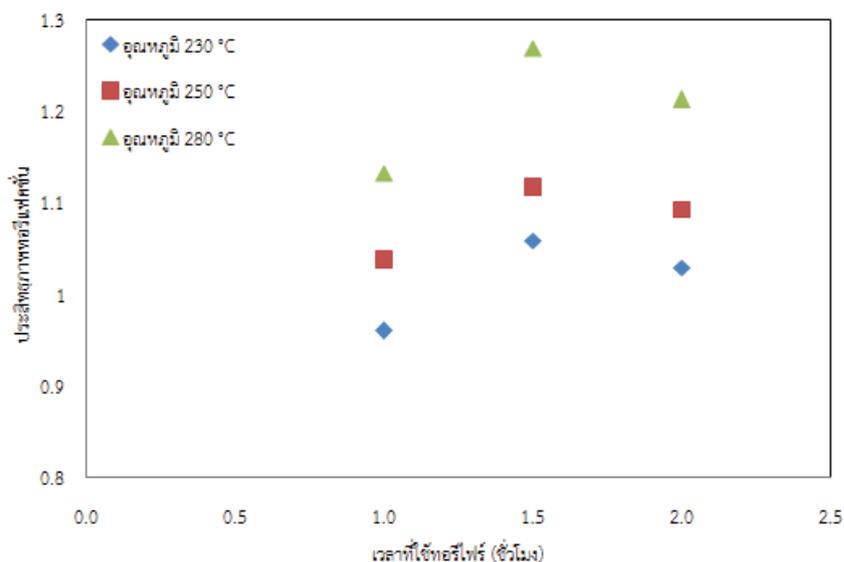
รูปที่ 4.28 แสดงผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านจากการทอรีแฟคชันต่อผลรวมของค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และแกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชัน

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับทางปาล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันจะมีค่า 0.959, 1.037 และ 1.132 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะพบว่าที่เวลานี้มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชันมีความ

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอดไฟร์สูงมากขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงพบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันของทางปาล์มน้ำมันจะมีค่าสูงสุดที่เวลาในการทอดไฟร์ 1.5 ชั่วโมง และจะลดลงในช่วงเวลาหลังจาก 1.5 ชั่วโมง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอดไฟร์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่เวลาในการทอดไฟร์แฟคชัน 1.5 ชั่วโมง และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เวลาในการทอดไฟร์แฟคชัน 2 ชั่วโมงสูงกว่า 1.5 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันมีแนวโน้มลดลง สำหรับทั้งที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอดไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันของทางปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0.959 และเมื่อเวลาในการทอดไฟร์แฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.058 ส่วนที่เวลาในการทอดไฟร์แฟคชันเป็น 2 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันจะลดลงเหลือเพียง 1.028 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอดไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันของทางปาล์มน้ำมันเท่ากับ 1.037 และเมื่อเวลาในการทอดไฟร์แฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.117 และที่เวลาในการทอดไฟร์แฟคชันเป็น 2 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันจะลดลงเหลือเพียง 1.092 สำหรับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันของฟางข้าวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับอุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส (1.132, 1.268 และ 1.212 ตามลำดับ) และประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันจะมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอดไฟร์เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง และจะต่ำกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอดไฟร์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเวลาที่เหมาะสมในการทอดไฟร์แฟคชันสำหรับทางปาล์มน้ำมัน โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จะพบว่าเวลาในการทอดไฟร์ 1.5 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุดในขณะที่เวลาในการทอดไฟร์ 2 และ 1 ชั่วโมงมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทอดไฟร์แฟคชันพบว่า 1.5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 280 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุด จะให้ประสิทธิภาพทอดไฟร์แฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.268 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดในทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอดไฟร์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 26.8 %



รูปที่ 4.28 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชันสำหรับทางปาล์มน้ำมัน

4.1.4.6 สรุปเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอริไฟร์สำหรับทางปาล์มน้ำมัน

สำหรับทางปาล์มน้ำมัน เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอริไฟร์ โดยการพิจารณา ลักษณะสี และผลได้เชิงมวลจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอริไฟร์ คือ 2 ชั่วโมง สำหรับที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอริไฟร์คือ 1.5 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอริแฟคชัน ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอริไฟร์คือ 1.5 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอ และความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงในการทอริไฟร์สำหรับทางปาล์มน้ำมันจะพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมคือ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุด ผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.67 ค่าความร้อนเท่ากับ 25.57 MJ/kg และประสิทธิภาพทอริแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.268 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดในทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านการทอริไฟร์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 26.8 %

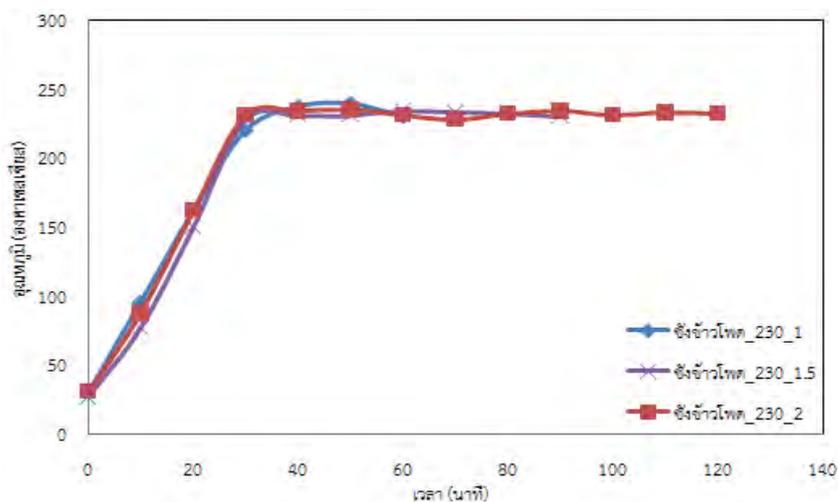
4.1.5 กรณีซังข้าวโพด

4.1.5.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอริแฟคชัน

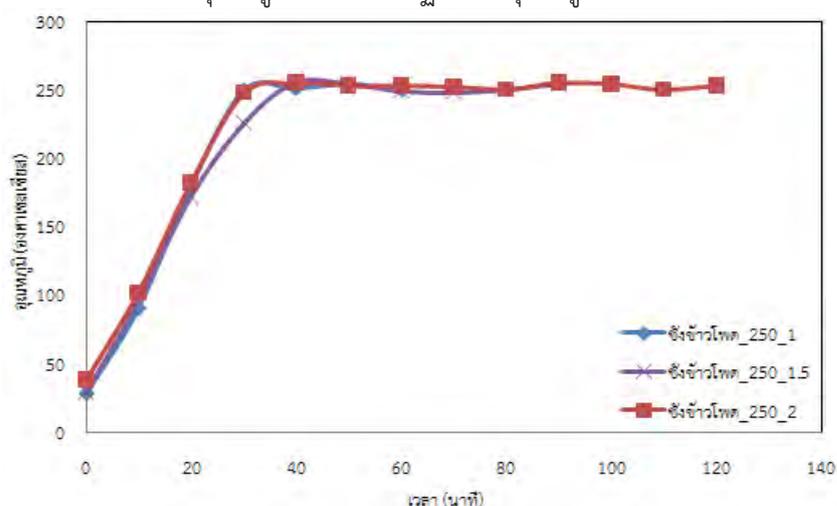
รูปที่ 4.29 - 4.31 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอริแฟคชันของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับซังข้าวโพด ที่กำหนดอุณหภูมิทอริแฟคชันที่ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ และข้อมูลในแต่ละกราฟจะแสดงเวลาในการทอริแฟคชัน 60, 90 และ 120 นาที จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอริแฟคชัน และทุกเวลาในการทอริแฟคชันนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอริแฟคชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่อกลักความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายใน

รับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถให้ความร้อนแก่ซังข้าวโพด และยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการภายในเวลา 30 นาที จากนั้นอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะถูกรักษาให้มีค่าคงที่ ด้วยการลดความร้อนในส่วนห้องให้ความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่ต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35]

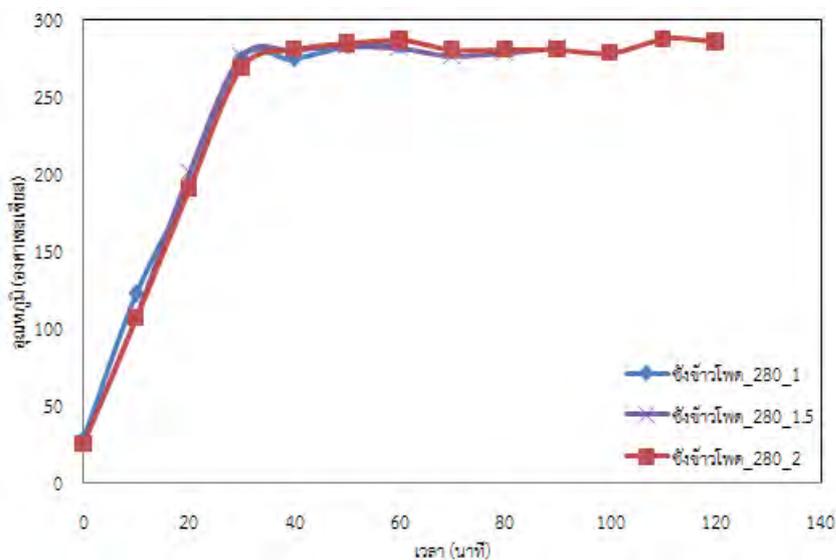
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่ออากาลึกความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชั่น และสำหรับกรณีซังข้าวโพดนั้น จำนวนท่อและครีบกกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่น



รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส

4.1.5.2 ลักษณะของซังข้าวโพดเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.32 แสดงลักษณะของซังข้าวโพดสดและซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชัน 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของซังข้าวโพดจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซังข้าวโพดส่วนใหญ่ไม่เปลี่ยนสี และพบซังข้าวโพดสีน้ำตาลเข้มบ้างเล็กน้อย และเมื่อบีบพบว่าซังข้าวโพดยังคงมีความเหนียว คล้ายกับซังข้าวโพดสด อย่างไรก็ตามที่เวลา 1 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันไม่ดี และการสลายตัวยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ส่วนที่ซังข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าซังข้าวโพดมีความเปราะ ที่เวลา 1.5 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซังข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าซังข้าวโพดมีความเปราะมาก ดังนั้นที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี



รูปที่ 4.32 ลักษณะของซังข้าวโพดเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เวลาต่างๆ

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซังข้าวโพดมีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซังข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อบีบพบว่าซังข้าวโพดมีความเปราะ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซังข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าซังข้าวโพดมีความเปราะมาก ที่เวลา 2 ชั่วโมงนี้ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชั่นอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียสจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้นสีของเหง้ามันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้น โดยที่เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าซังข้าวโพดมีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด

และมีความเปราะ ซึ่งสรุปได้ว่ามีความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันดี ส่วนที่เวลา 1.5 ชั่วโมงพบว่า ลักษณะซึ่งข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าซึ่งข้าวโพดมีความเปราะ สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี และที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าซึ่งข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และไม่แตกต่างจากเวลา 1.5 ชั่วโมง สรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

สำหรับลักษณะซึ่งข้าวโพดจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชันซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]

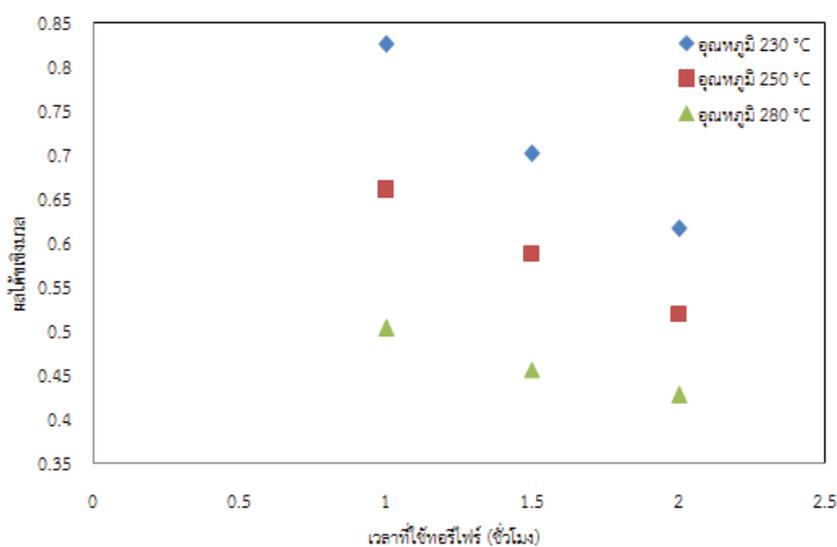
4.1.5.3 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวล

จากรูปที่ 4.33 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับ ซึ่งข้าวโพด จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล ซึ่งนิยามโดยผลหารของมวลแห้งสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันต่อมวลแห้งเริ่มต้น แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (ชั่วโมง) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์รวมกับเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดของ ส่วนทอรีแฟคชันเป็นเวลา 30 นาที

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลได้เชิงมวลลดลง โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลจะมีค่า 0.83, 0.66 และ 0.50 สำหรับ อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เวลาในการทอรีไฟร์สูงขึ้น 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของสัดส่วนผลได้เชิงมวลสำหรับทุกค่าอุณหภูมิ ดังนั้น จึงพบว่าผลได้เชิงมวลมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลได้ของมวลลดลง โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ผลได้เชิงมวลจะมีค่า 0.83, 0.66 และ 0.50 สำหรับ อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชัน ซึ่งก็คือค่าประมาณ 0.7 จะพบว่าที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส สัดส่วนผลได้เชิงมวลมีค่าใกล้เคียง 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพการสลายตัวที่สมบูรณ์ และเวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียสให้ค่าสัดส่วนผลได้เชิงมวล 0.59 และ 0.45 สำหรับเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง จะพบว่าอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ให้ค่า สัดส่วนผลได้เชิงมวล 0.61, 0.52 และ 0.43 ตามลำดับ

ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อเวลาในการทอรีไฟร์มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ผลได้เชิงมวลจะมีค่าลดลง เนื่องจากอัตราการสลายตัวของซึ่งข้าวโพดเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วอนุภาค[38] [39] และเมื่อพิจารณา สัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของซึ่งข้าวโพด เพื่อใช้กำหนด ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชัน โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชันที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1.5 ชั่วโมง และสำหรับการทอรีไฟร์ ที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.33 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับซังข้าวโพด

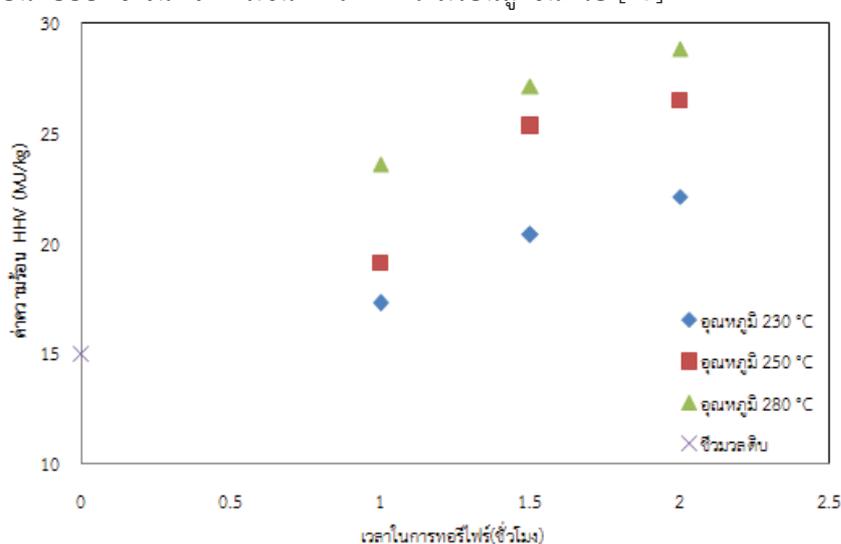
4.1.5.4 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.38 แสดงผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพดจากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (ชั่วโมง)

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่าเท่ากับ 17.28, 19.08 และ 23.58 MJ/kg จะพบว่าที่เวลานี้ค่าความร้อนความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าความร้อนจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน เนื่องจากอัตราการสลายตัวของซังข้าวโพดสลายตัวได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิการทอรีแฟคชั่นเพิ่มสูงขึ้น

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ซังข้าวโพดให้ค่าความร้อน 17.28 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 20.39 และ 22.09 MJ/kg ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ซังข้าวโพดให้ค่าความร้อน 19.08 MJ/kg และเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็น 25.33 และ 26.46 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (23.58, 27.14 และ 28.83 MJ/kg ตามลำดับ) จะพบว่าเมื่อเวลาในการทอรีแฟคชั่นมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่าความร้อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามด้วย อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามเวลาการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นคิดเป็น 15.43 - 47.56%, 27.45 - 76.75 % และ 57.51 - 92.59 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของซังข้าวโพดดิบ

ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชัน จะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของซังข้าวโพดจากผ่านกระบวนการดังกล่าว กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของซังข้าวโพดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในซังข้าวโพดได้แก่ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชันเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในขณะที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน[40, 41, 42] และซังข้าวโพดที่ถูกทอรีไฟร์ คาร์บอนจะทำหน้าที่คายความร้อน ในขณะที่ออกซิเจนจะทำหน้าที่ดูดความร้อน ทำให้สัดส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย [43]



รูปที่ 4.34 ผลของเวลาในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพด

4.1.5.5 ผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน

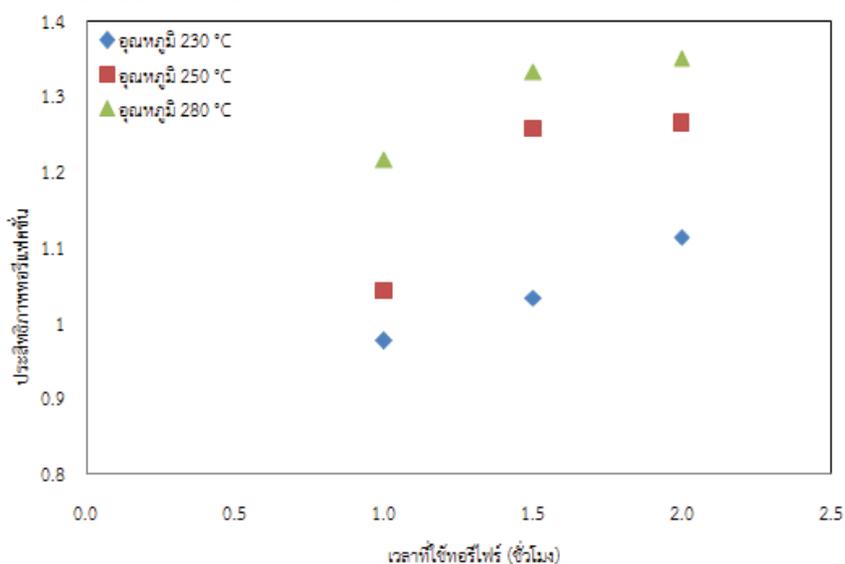
รูปที่ 4.35 แสดงผลของเวลาในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของซังข้าวโพดที่ผ่านจากการทอรีแฟคชันต่อผลรวมของค่าความร้อนของซังข้าวโพดดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์ และแกนนอนแสดงเวลาที่ใช้ในการทอรีแฟคชัน

จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อเวลาในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับซังข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทอรีไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันจะมีค่า 0.975, 1.041 และ 1.215 สำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะพบว่าที่เวลานี้มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของซังข้าวโพดที่ผ่านจากการทอรีไฟร์สูงขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงพบว่าค่อยข้างเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอรีไฟร์

1.5 และ 2 ชั่วโมง จะพบว่าค่าประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

จากรูปจะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทอริไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอริแฟคชันของซังข้าวโพดเท่ากับ 0.975 และเมื่อเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.033 และ 1.114 ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสที่เวลาในการทอริไฟร์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพทอริแฟคชันของซังข้าวโพดเท่ากับ 1.041 และเมื่อเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.256 และ 1.264 ตามลำดับ ซึ่งเป็นในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพทอริแฟคชันของซังข้าวโพดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (1.215, 1.332 และ 1.350 ตามลำดับ) จะพบว่าเมื่อเวลาในการทอริไฟร์มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชันของซังข้าวโพดจะเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพทอริแฟคชันจะมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของซังข้าวโพดที่ผ่านจากการทอริไฟร์เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง และจะต่ำกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของซังข้าวโพดที่ผ่านจากการทอริไฟร์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเวลาที่เหมาะสมในการทอริแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอริแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด จะพบว่าเวลาในการทอริไฟร์ 2 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุดในขณะที่เวลาในการทอริไฟร์ 1.5 และ 1 ชั่วโมงมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทอริแฟคชันพบว่า ชั่วโมงที่เหมาะสมที่สุด 1.5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 280 จะให้ประสิทธิภาพทอริแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.350 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดในซังข้าวโพดที่ผ่านการทอริไฟร์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 35.0 %



รูปที่ 4.35 ผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพทอริแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด

4.1.4.6 สรุปเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับซังข้าวโพด

สำหรับซังข้าวโพด เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์โดยการพิจารณา ลักษณะสีและผลได้เชิงมวลจะพบว่า อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์ คือ 1.5 ชั่วโมง สำหรับการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 1 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น จะพบว่าอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คือ 2 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอ และความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงในการทอรีไฟร์สำหรับซังข้าวโพดจะพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเดินเตาปฏิกรณ์คือ 280 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุด ผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.43 ค่าความร้อนเท่ากับ 28.83 MJ/kg และประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุดเท่ากับ 1.350 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดในซังข้าวโพด ที่ผ่านการทอรีไฟร์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 35.0 %

4.2 ผลและการวิเคราะห์ผล: กรณีศึกษาที่ 2 การใช้ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง

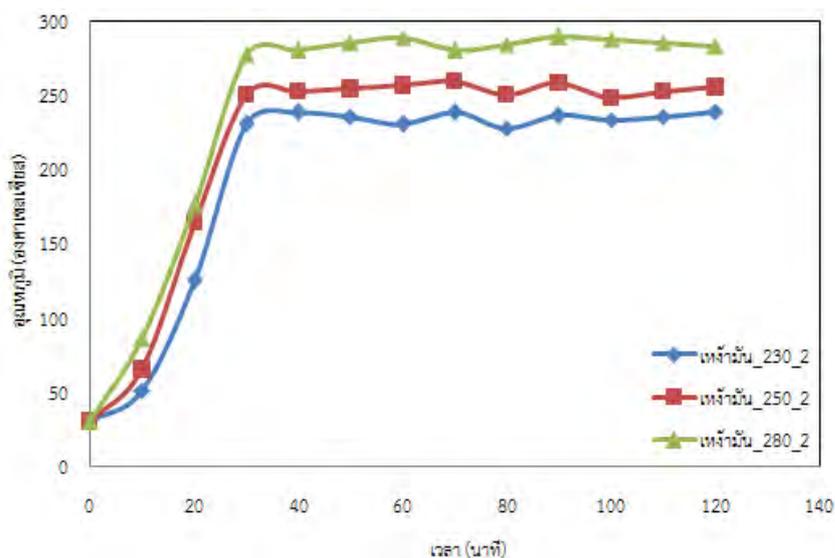
ในการศึกษากรณีศึกษาที่ 2 จะเป็นการศึกษาเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ ด้วยชนิดเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันกับกรณีศึกษาที่ 1 กล่าวคือ เปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากแก๊สหุงต้มเป็นชีวมวลฟางข้าวอัดแท่งตะเกียบ สำหรับชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง 5 ชนิด คือ ใบและยอดอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ซังข้าวโพดทางปาล์ม และฟางข้าว ซึ่งแต่ละชีวมวลจะทำการที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส โดยที่ การทดลองแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง สำหรับผลการทดลองเป็นดังนี้

4.2.1 กรณีเหง้ามันสำปะหลัง

4.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับเหง้ามันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชั่น 120 นาที จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ในเวลาที่กำหนดนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นและถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่อกลักความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนให้แก่เหง้ามันสำปะหลัง และสามารถยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35] และเมื่อสังเกตอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นที่มีแนวโน้มคงที่ไม่สม่ำเสมอหลังจากค่าที่กำหนด เนื่องจากเตาแก๊สซีพีเออร์รูปแบบโดนัท ไม่สามารถควบคุมและปรับปริมาณความร้อนของส่วนให้ความร้อนได้เสถียรดีเท่าที่ควร

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยต่อความร้อนชนิดที่อากาศความ
ร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชันและสำหรับกรณีเหง้ามันสำปะหลังนั้น จำนวนท่อ
และ ครีบกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความ
ร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชัน



รูปที่4.36 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆ
ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 120 นาที

4.2.1.2 ลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 แสดงลักษณะของเหง้ามันสำปะหลังสดและเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่าน
กระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรี
แฟคชัน 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าลักษณะเหง้ามัน
สำปะหลังที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อเมื่อปิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่าความเปราะมาก ดังนั้นที่เวลา 2
ชั่วโมงสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าลักษณะเหง้ามัน
สำปะหลังที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และเมื่อปิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่ามีความเปราะมาก ดังนั้นที่เวลา 2
ชั่วโมงสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าลักษณะเหง้ามัน
สำปะหลังที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด และเมื่อปิบเหง้ามันสำปะหลังพบว่ามีความเปราะ สรุปลได้ว่าความ
สม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

สำหรับลักษณะของเหง้ำมันสำปะหลังจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]



รูปที่ 4.37 ลักษณะของเหง้ำมันสำปะหลังที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง

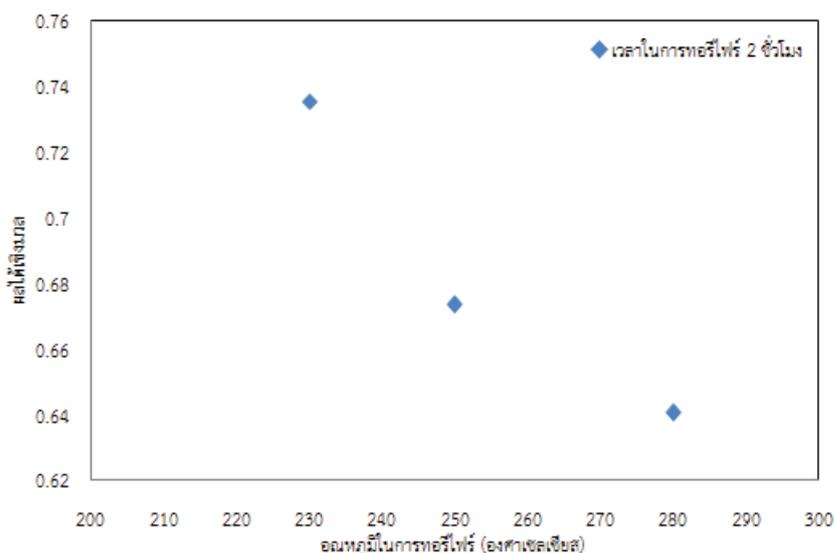
4.2.1.3 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวล

จากรูปที่ 4.38 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับเหง้ำมันสำปะหลัง จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล ซึ่งนิยามโดยผลหารของมวลแห้งสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นต่อมวลแห้งเริ่มต้น แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ผลได้ของมวลจะมีค่า 0.736, 0.674 และ 0.641 พบว่าผลได้ของมวลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากพอที่จะนำความร้อนจากผิวด้านนอกของอนุภาคเข้าสู่ด้านในของอนุภาคเพื่อทำปฏิกิริยาละลายตัว น้ำหนักของเหง้ำมันสำปะหลังที่สูญเสียไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาจึงเป็นผลมาจากการสลายตัวของ Hemicelluloses ซึ่งเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200- 250°C ส่วนที่อุณหภูมิยิ่งสูงการสลายตัวยิ่งมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวของ cellulose กับ lignin บางส่วน คือ cellulose จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-350°C ในขณะที่ lignin จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 280-500°C[44]

ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการสลายตัวที่มีค่าสูงขึ้นตามด้วย ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลมีค่าลดลง[24] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของเหง้ำมันสำปะหลัง เพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชั่น โดย

พิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีที่สุดสำหรับการทอรีแฟคชั่นที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.38 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับเหง้ำมันสำปะหลัง

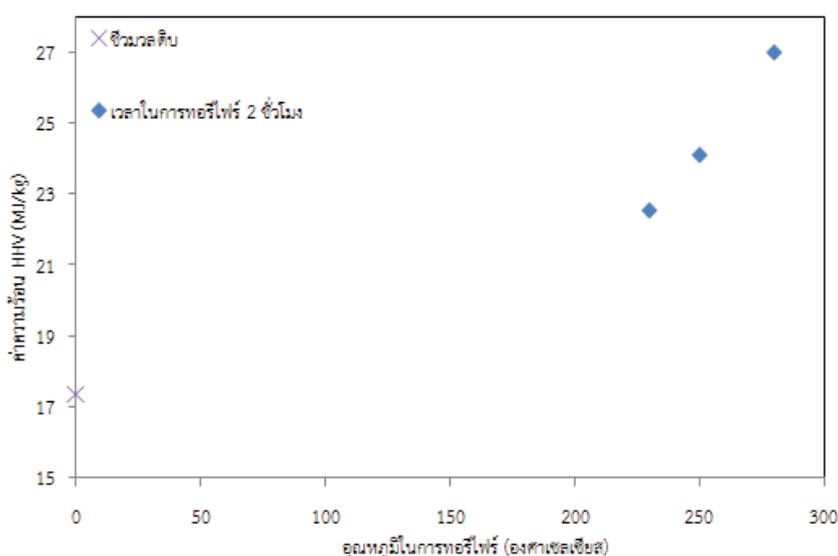
4.2.1.4 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.39 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับเหง้ำมันสำปะหลัง จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่น (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับเหง้ำมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่า 22.50, 24.13 และ 27.01 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นดังกล่าว พบว่าค่าความร้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในเหง้ำมันสำปะหลังได้แก่เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในระหว่างปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สัดส่วนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 220-250 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ในช่วง 250 – 300 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงการสลายตัวของลิกนิน และเซลลูโลส[40, 41, 42] จากเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส สูงกว่าค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา[24] [43] อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศา

เซลล์ชีสด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงคิดเป็น 30%, 39.1% และ 55.7% เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังดิบ

ดังนั้นอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังหลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าว โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.39 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง

4.2.1.5 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน

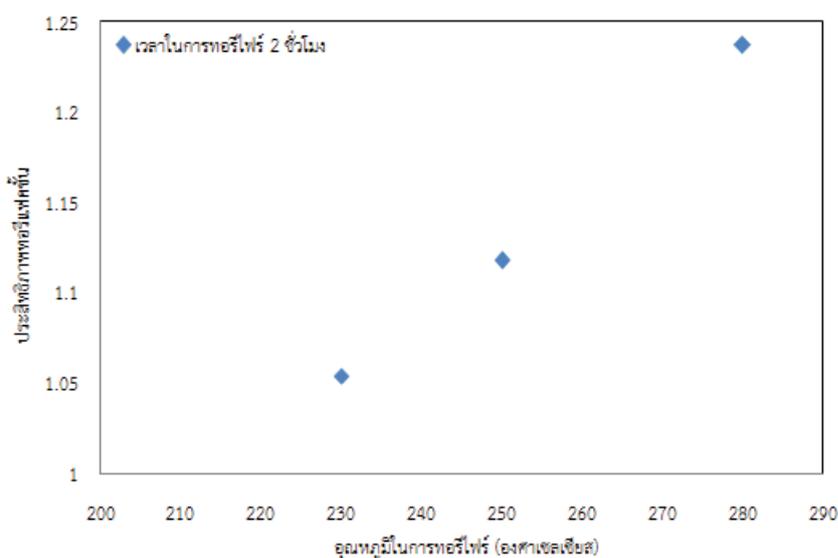
สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน เป็นการชี้วัดอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ เพื่อใช้ในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยพิจารณาเลือกจากอุณหภูมิที่ให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุด

รูปที่ 4.40 แสดงผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีแฟคชันต่อผลรวมของค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังเริ่มต้นกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และแกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับเหง้ามันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันจะมีค่า 1.054, 1.118 และ 1.237 ตามลำดับ จะพบว่าที่อุณหภูมิในการทอรีไฟร์ดังกล่าว มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีไฟร์สูงขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์นั้นพบว่าค่อยข้างเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่า

ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกด้วย และพบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันจะมีค่าสูงกว่า 1 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านจากการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์

ดังนั้นเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชันสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง จะพบว่าอุณหภูมิในการทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด จะให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.237 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับเหง้ามันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 23.7 % ในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 230 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 4.40 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับเหง้ามันสำปะหลัง

4.2.1.6 สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับเหง้ามันสำปะหลัง

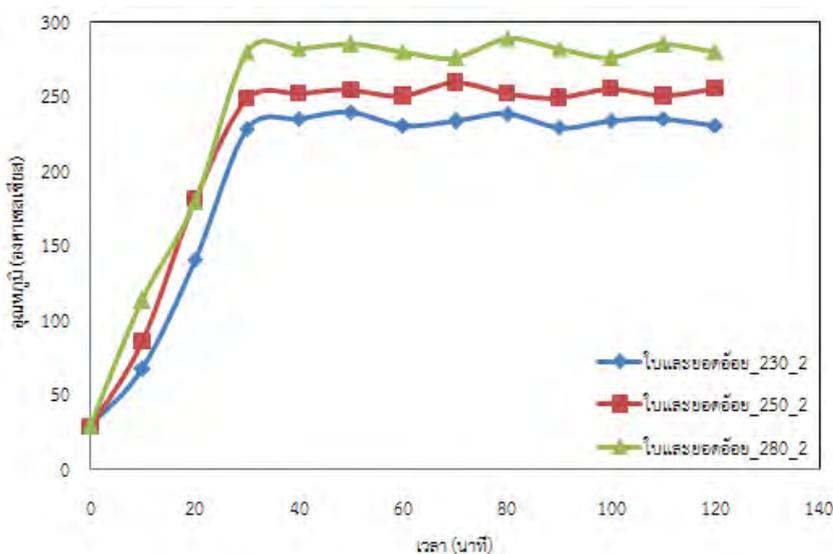
สำหรับเหง้ามันสำปะหลัง อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์ด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง โดยการพิจารณาลักษณะสีและผลได้เชิงมวลจะพบว่า สำหรับเหง้ามันสำปะหลังนั้น อุณหภูมิสำหรับการทอรีไฟร์คืออุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน จะพบว่าอุณหภูมิสำหรับการทอรีไฟร์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอและความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเวลาการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงจะพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเดินเตาปฏิกรณ์คือ 280 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด ซึ่งผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.641 ค่าความร้อนเท่ากับ 27.01 MJ/kg และประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.237 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับเหง้ามันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 23.7 %

4.2.2 กรณีใบและยอดอ้อย

4.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.41 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับใบและยอดอ้อย ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชั่น 120 นาที จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ในเวลาที่กำหนดนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นและถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่อถักความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่นและถ่ายเทความร้อนให้แก่ใบและยอดอ้อย และสามารถยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35] และเมื่อสังเกตอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแฟคชั่นที่มีแนวโน้มคงที่ไม่สม่ำเสมอหลังจากค่าที่กำหนด เนื่องจากเตาแก๊สซีไฟเออร์รูปแบบโดนัทไม่สามารถควบคุมและปรับปริมาณความร้อนของส่วนให้ความร้อนได้เสถียรดีเท่าที่ควร

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่อถักความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชั่นและสำหรับกรณีใบและยอดอ้อยนั้น จำนวนท่อและครีบริบายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่น



รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 120 นาที

4.2.2.2 ลักษณะของใบและยอดอ้อยเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.42 แสดงลักษณะของใบและยอดอ้อยสดและใบและยอดอ้อยที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชัน 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตกร่วน ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตกร่วนดีมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงลักษณะใบและยอดอ้อยที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าใบและยอดอ้อยแตกร่วนดีมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดีเหมือนกับที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 และ 250 องศาเซลเซียส

สำหรับลักษณะใบและยอดอ้อยจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]



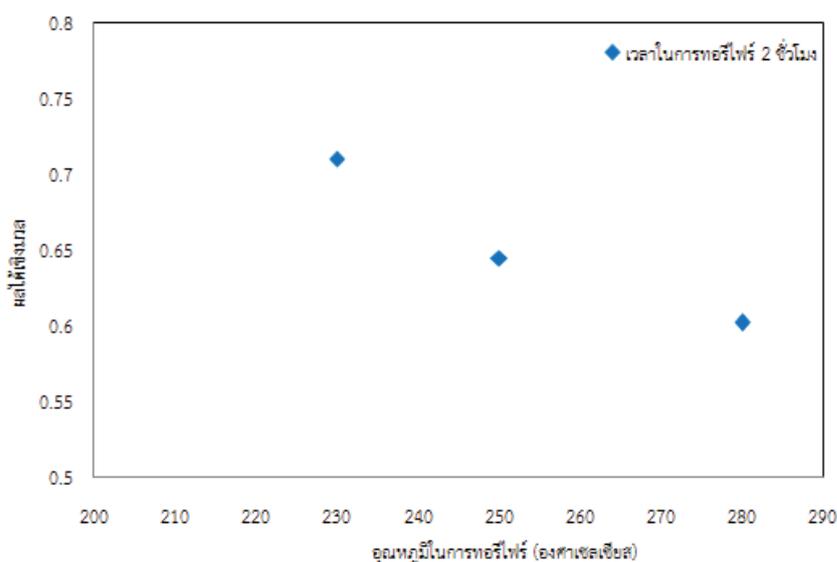
รูปที่ 4.42 ลักษณะของใบและยอดอ้อยที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง

4.2.2.3 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวล

จากรูปที่ 4.43 แสดงผลของอุณหภูมิกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับใบและยอดอ้อย จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ผลได้เชิงมวลจะมีค่า 0.710, 0.678 และ 0.602 พบว่าผลได้เชิงมวลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการกระจายความร้อนทำได้ดีจนการทำปฏิกิริยามีความสม่ำเสมอทั่วถึง และความหนาแน่นของใบและยอดอ้อยมีค่าน้อย และน้ำหนักของใบและยอดอ้อยจะสูญเสียไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอรีไฟร์จึงเป็นผลมาจากการสลายตัวของ Hemicelluloses ซึ่งเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-250°C ส่วนที่อุณหภูมิยิ่งสูงการสลายตัวยิ่งมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวของ cellulose กับ lignin บางส่วน คือ cellulose จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-350°C ในขณะที่ lignin จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 280-500°C[44]

ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการสลายตัวที่มีค่าสูงขึ้นตามด้วย ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลมีค่าลดลง[24] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของใบและยอดอ้อย เพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์แฟคชัน โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีไฟร์แฟคชันที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียสมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



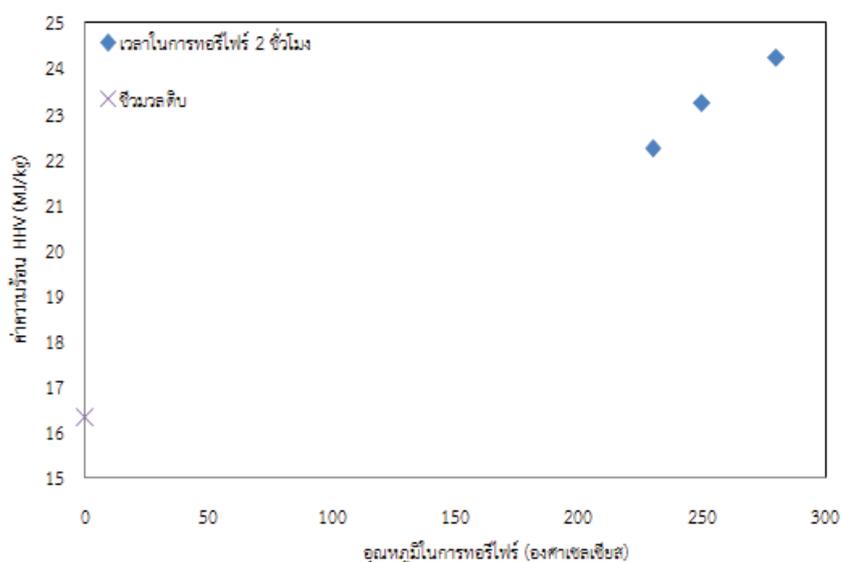
รูปที่ 4.43 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีไฟร์แฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับใบและยอดอ้อย

4.2.2.4 ผลของอุณหภูมิในการทอรีไฟร์แฟคชันที่มีต่อค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.44 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีไฟร์แฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับใบและยอดอ้อย จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับไบและยอตอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่า 22.23, 23.23 และ 24.23 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิในการทอรีไฟร์ดังกล่าว พบว่าค่าความร้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในไบและยอตอ้อยได้แก่เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในระหว่างปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สัดส่วนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 220-250 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ในช่วง 250 – 300 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงการสลายตัวของลิกนิน และเซลลูโลส[40, 41, 42] จากเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส สูงกว่าค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา[24] [43] อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงคิดเป็น 36.32%, 42.48% และ 48.60% เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของไบและยอตอ้อยดิบ

ดังนั้นอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังหลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าว โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.44 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับไบและยอตอ้อย

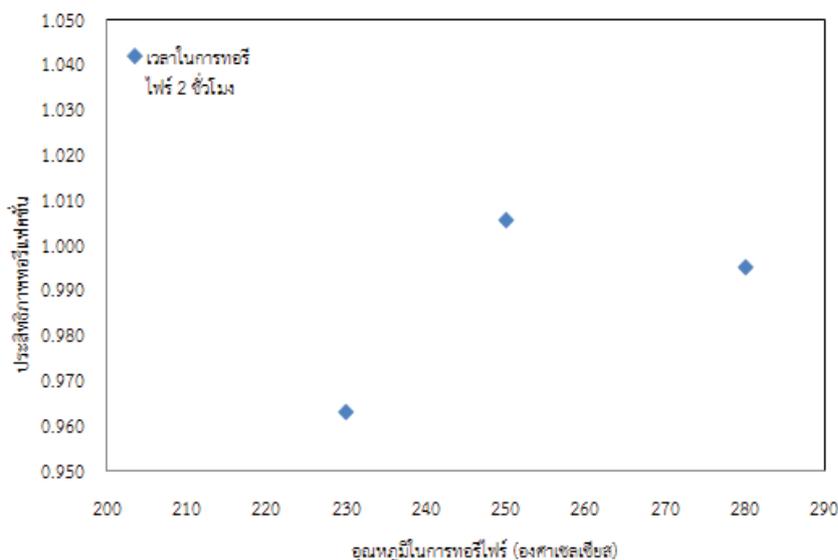
4.2.2.5 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น เป็นการชี้วัดอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ เพื่อใช้ในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยพิจารณาเลือกจากอุณหภูมิที่ให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุด

รูปที่ 4.45 แสดงผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับไบและยอดอ้อย จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นต่อผลรวมของค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และแกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นช่วงอุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับไบและยอดอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้น (ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นเท่ากับ 0.963 และ 1.005 สำหรับอุณหภูมิ 230 และ 250 องศาเซลเซียสตามลำดับ) เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยที่ผ่านจากการทอรีไฟร์สูงขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงพบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์หลังจากช่วงอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับไบและยอดอ้อยมีค่าลดลง (ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นเท่ากับ 0.995 สำหรับอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยที่ผ่านจากการทอรีไฟร์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 280 สูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มลดลง และพบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยที่ผ่านจากการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์ แต่มีค่าต่ำกว่า 1 เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของไบและยอดอ้อยที่ผ่านจากการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์

ดังนั้นเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชั่นสำหรับไบและยอดอ้อย โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับไบและยอดอ้อย จะพบว่าอุณหภูมิในการทอรีไฟร์ 250 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุดเท่ากับ 1.050 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับไบและยอดอ้อยที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 5.0 % ในขณะที่อุณหภูมิ 280 และ 230 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 4.45 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอริไฟร์สำหรับใบและยอดอ้อย

4.2.2.6 สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอริไฟร์สำหรับใบและยอดอ้อย

สำหรับใบและยอดอ้อย อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอริไฟร์ด้วยเวลาในการทอริไฟร์ 2 ชั่วโมง โดยการพิจารณาลักษณะสีและผลได้เชิงมวลจะพบว่า อุณหภูมิสำหรับการทอริไฟร์คืออุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส 0 และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอริไฟร์ จะพบว่าอุณหภูมิสำหรับการทอริไฟร์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 0 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอและความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเวลาการทอริไฟร์ 2 ชั่วโมงจะพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25 องศาเซลเซียส 0 ซึ่งผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.678 ค่าความร้อนเท่ากับ 23.23 MJ/kg และประสิทธิภาพทอริไฟร์สูงสุดเท่ากับ 1.050 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับใบและยอดอ้อยที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 5.0 %

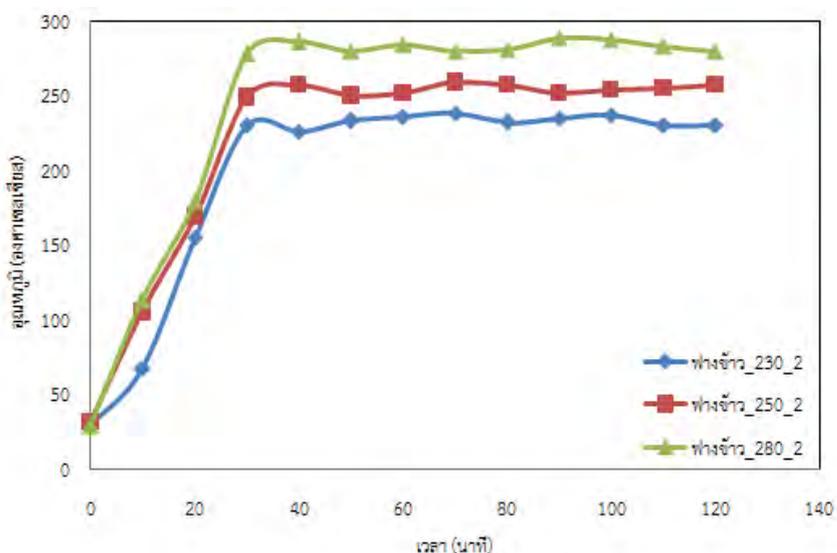
4.2.3 กรณีฟางข้าว

4.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอริไฟร์

รูปที่ 4.46 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอริไฟร์ของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับฟางข้าว ที่อุณหภูมิทอริไฟร์ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอริไฟร์ 120 นาที จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอริไฟร์ ในเวลาที่กำหนดนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอริไฟร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่อกลักความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอริไฟร์และถ่ายเทความร้อนให้แก่ฟางข้าว และสามารถยกระดับอุณหภูมิให้

สูงขึ้นได้ตามต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแพคชั้นจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35] และเมื่อสังเกตอุณหภูมิภายในส่วนทอรีแพคชั้นที่มีแนวโน้มคงที่ไม่สม่ำเสมอหลังจากค่าที่กำหนด เนื่องจากเตาแก๊สซีไฟเออร์รูปแบบโดนัท ไม่สามารถควบคุมและปรับปริมาณความร้อนของส่วนให้ความร้อนได้เสถียรดีเท่าที่ควร

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่ออากาศความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแพคชั้นและสำหรับกรณีฟางข้าว นั้น จำนวนท่อและครีบกกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแพคชั้น



รูปที่ 4.46 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้นต่างๆ ที่เวลาในการทอรีแพคชั้น 120 นาที

4.2.3.2 ลักษณะของฟางข้าวเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.47 แสดงลักษณะของฟางข้าวสดและฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการทอรีแพคชั้นที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแพคชั้น 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 230 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้มเกือบทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าฟางข้าวมีความเปราะมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแพคชั้นอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าฟางข้าวมีความเปราะมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะฟางข้าวที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าฟางข้าวแตกร่วนดีมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดีเหมือนกับที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส

สำหรับลักษณะฟางข้าวจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]



รูปที่ 4.47 ลักษณะของฟางข้าวที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง

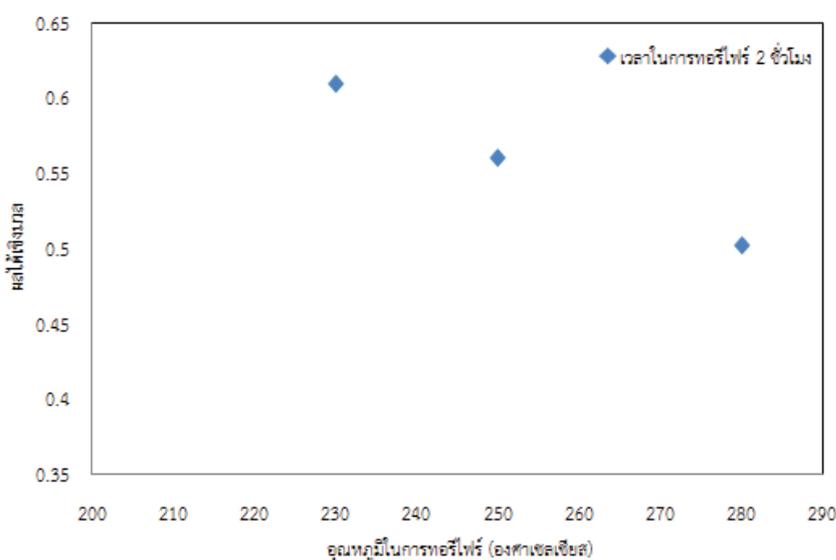
4.2.3.3 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวล

จากรูปที่ 4.48 แสดงผลของอุณหภูมิกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับฟางข้าว จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.609, 0.560 และ 0.502 ตามลำดับ ซึ่งผลได้เชิงมวลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความหนาแน่นของฟางข้าวมีค่าน้อย ทำให้เกิดการนำความร้อนจากผิวนอกเข้าสู่ด้านในของฟางข้าวได้ดี และน้ำหนักของฟางข้าวที่สูญเสียไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอรีไฟร์จึงเป็นผลมาจากการสลายตัวของ Hemicelluloses ซึ่งเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200 - 250°C ส่วนที่อุณหภูมิยิ่งสูงการสลายตัวยิ่งมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวของ

cellulose กับ lignin บางส่วน คือ cellulose จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-350°C ในขณะที่ lignin จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 280-500°C[44]

ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการสลายตัวที่มีค่าสูงขึ้นตามด้วย ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลมีค่าลดลง[24] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการสลายตัวของฟางข้าว เพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชั่น โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีที่สุดสำหรับการทอรีแฟคชั่นที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียสมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 4.48 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับฟางข้าว

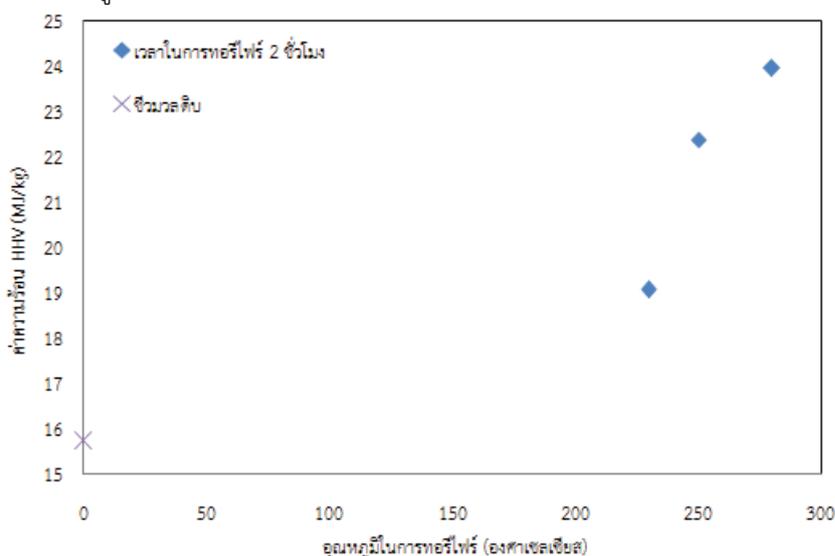
4.2.3.4 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.49 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับฟางข้าว จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีแฟคชั่น (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับฟางข้าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่า 19.06, 22.38 และ 23.95 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นดังกล่าว พบว่าค่าความร้อนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในฟางข้าวได้แก่เอมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในระหว่างปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สัดส่วนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณที่

แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 220-250 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ในช่วง 250 – 300 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงการสลายตัวของลิกนิน และเซลลูโลส[40, 41, 42] จากเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส สูงกว่าค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา[24] [43] อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงคิดเป็น 21.18%, 42.29% และ 52.27% เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของฟางข้าวดิบ

ดังนั้น อุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของฟางข้าว หลังจากการทอรีไฟร์ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของฟางข้าวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.49 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับฟางข้าว

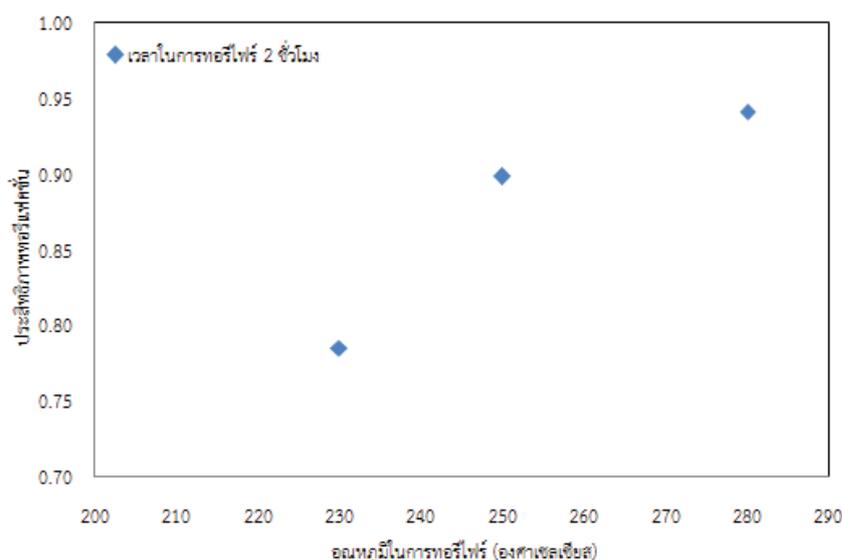
4.2.3.5 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน เป็นการชี้วัดอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ เพื่อใช้ในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยพิจารณาเลือกจากอุณหภูมิที่ให้ค่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุด

รูปที่ 4.50 แสดงผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าว จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของฟางข้าวที่ผ่านจากการทอรีแฟคชันต่อผลรวมของค่าความร้อนของฟางข้าวดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงและแกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันจะมีค่า 0.785, 0.898 และ 0.941 ตามลำดับ จะพบว่าที่อุณหภูมิในการทอรีไฟร์ดังกล่าว มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันมีค่าต่ำกว่า 1 เพราะการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของฟางข้าวที่ผ่านจากการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์

ดังนั้นเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าว โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าว จะพบว่าอุณหภูมิในการทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 0.941 แสดงว่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานต่ำสุดสำหรับแห้งมันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เพียง 5.9 % ในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 230 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 4.50 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับฟางข้าว

4.2.3.6 สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับฟางข้าว

สำหรับฟางข้าว อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์ด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง โดยการพิจารณาลักษณะสีและผลได้เชิงมวลจะพบว่า สำหรับฟางข้าว นั้น อุณหภูมิสำหรับการทอรีไฟร์คือ อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน จะพบว่าอุณหภูมิสำหรับการทอรีไฟร์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอและความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงในการทอรีไฟร์สำหรับเวลาการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงจะพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเดินเตาปฏิกรณ์คือ 280 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด ซึ่งผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.502 ค่า

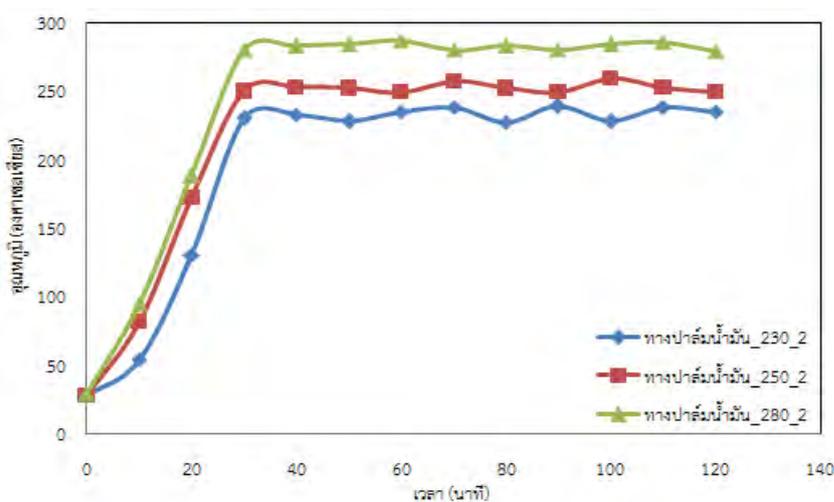
ความร้อนเท่ากับ 23.95 MJ/kg ประสิทธิภาพทอริแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 0.941 แสดงว่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานต่ำสุดสำหรับเห้งน้ำมันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เพียง 5.9 %

4.2.4 กรณีทางปาล์มน้ำมัน

4.2.4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอริแฟคชัน

รูปที่ 4.51 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอริแฟคชันของเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับทางปาล์มน้ำมัน ที่อุณหภูมิทอริแฟคชัน 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอริแฟคชัน 2 ชั่วโมง จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอริแฟคชัน ในเวลาที่กำหนดนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอริแฟคชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นและถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่อถักความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอริแฟคชันและถ่ายเทความร้อนให้แก่ทางปาล์มน้ำมัน และสามารถยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอริแฟคชันจะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35] และเมื่อสังเกตอุณหภูมิภายในส่วนทอริแฟคชันที่มีแนวโน้มคงที่ไม่สม่ำเสมอหลังจากค่าที่กำหนด เนื่องจากเตาแก๊สซีไฟเออร์รูปแบบโดนัทไม่สามารถควบคุมและปรับปริมาณความร้อนของส่วนให้ความร้อนได้เสถียรดีเท่าที่ควร

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่อถักความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอริแฟคชันและสำหรับกรณีทางปาล์มน้ำมันนั้น จำนวนท่อและครีบกกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอริแฟคชัน



รูปที่ 4.51 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอริแฟคชันต่างๆ ที่เวลาในการทอริแฟคชัน 120 นาที

4.2.4.2 ลักษณะของทางปาล์มน้ำมันเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.52 แสดงลักษณะของทางปาล์มน้ำมันสดและทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแฟคชัน 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มเป็นส่วนใหญ่ แต่ยังไม่เป็นสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าทางปาล์มน้ำมันมีความเปราะไม่มาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับไม่ค่อยดี

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มเกือบทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าทางปาล์มน้ำมันมีความเปราะมากขึ้นเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดีพอใช้

ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะทางปาล์มน้ำมันที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อบีบพบว่าทางปาล์มน้ำมันมีความเปราะมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแฟคชันอยู่ในระดับดี

สำหรับลักษณะทางปาล์มน้ำมันจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]



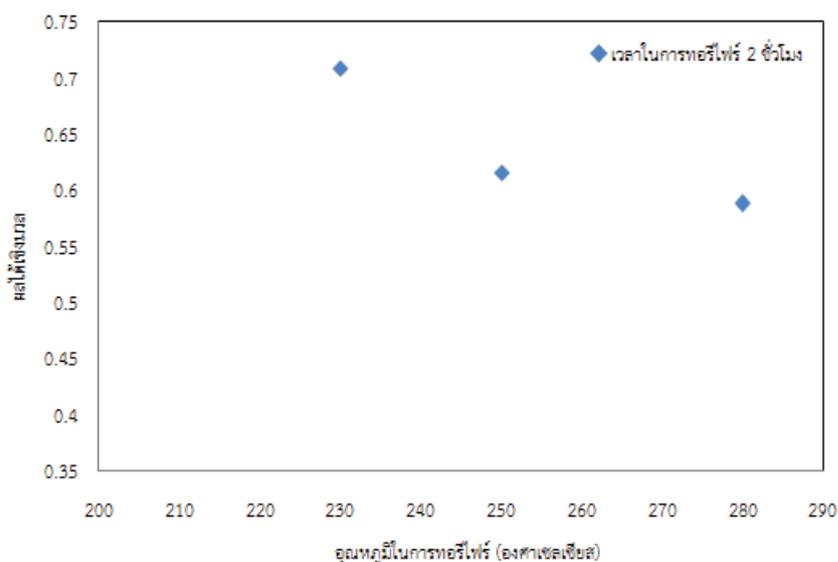
รูปที่ 4.52 ลักษณะของทางปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง

4.2.4.3 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวล

จากรูปที่ 4.53 แสดงผลของอุณหภูมิกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จากรูปแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีแฟค (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีแฟค 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ผลได้เชิงมวลจะมีค่า 0.709, 0.616 และ 0.588 พบว่าผลได้เชิงมวลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากพอที่จะนำความร้อนจากผิวด้านนอกของอนุภาคเข้าสู่ด้านในของอนุภาคเพื่อทำปฏิกิริยาละลายตัว น้ำหนักของทางปาล์มน้ำมันที่สูญเสียไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอรีแฟคจึงเป็นผลมาจากการละลายตัวของ Hemicelluloses ซึ่งเกิดการละลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-250°C ส่วนที่อุณหภูมิยิ่งสูงการละลายตัวยิ่งมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการละลายตัวของ cellulose กับ lignin บางส่วน คือ cellulose จะละลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-350°C ในขณะที่ lignin จะละลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 280-500°C[44]

ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการละลายตัวที่มีค่าสูงขึ้นตามด้วย ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลมีค่าลดลง[24] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการละลายตัวของทางปาล์มน้ำมัน เพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชัน โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีสำหรับการทอรีแฟคชันที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียสมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



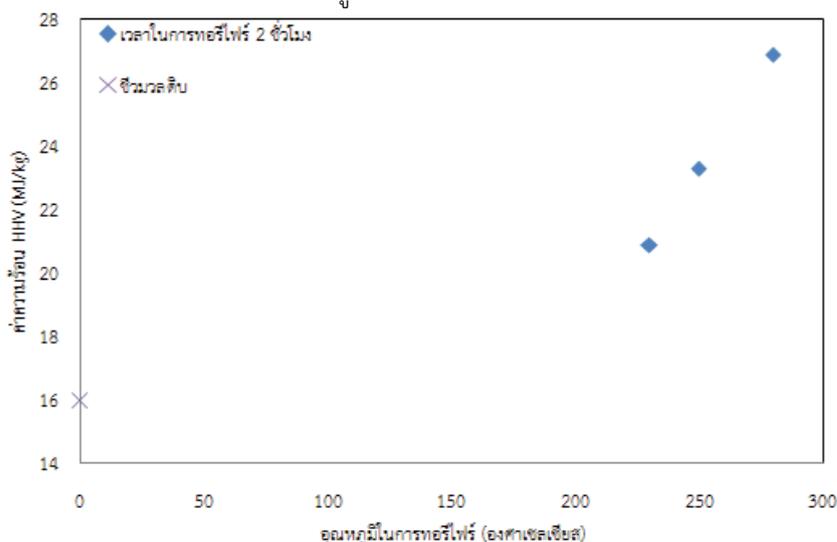
รูปที่ 4.53 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับทางปาล์มน้ำมัน

4.2.4.4 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.54 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่า 20.89, 23.28 และ 26.90 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิในการทอรีไฟร์ดังกล่าว พบว่าค่าความร้อนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในทางปาล์มน้ำมันได้แก่ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน ที่สูญเสียไปในระหว่างปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สัดส่วนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในช่วง 220-250 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ในช่วง 250 – 300 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงการสลายตัวของลิกนิน และเซลลูโลส[40, 41, 42] จากเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส สูงกว่าค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา[24] [43] อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงคิดเป็น 30.90%, 45.84% และ 68.52% เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันดิบ

ดังนั้นอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันหลังจากผ่านกระบวนการ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย



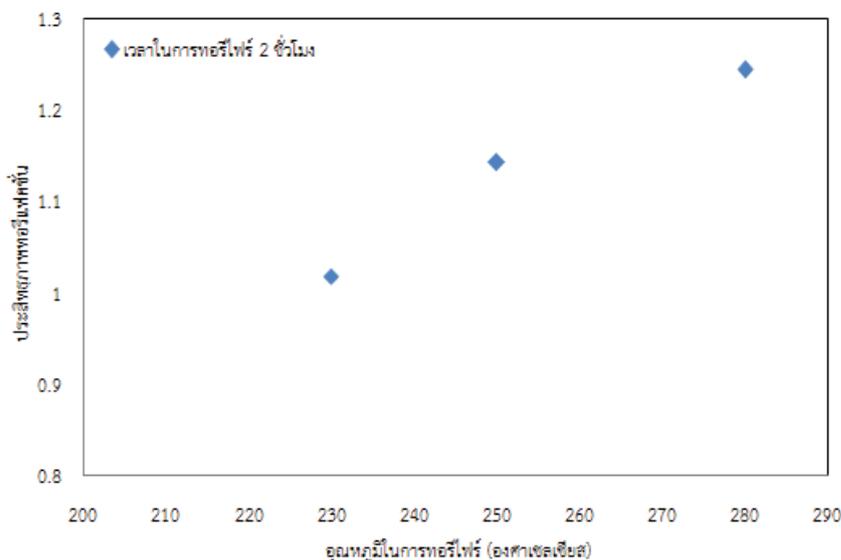
รูปที่ 4.54 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับทางปาล์มน้ำมัน

4.2.4.5 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.55 แสดงผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านจากการทอรีแฟคชั่นต่อผลรวมของค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และแกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับทางปาล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่า 1.017, 1.142 และ 1.244 ตามลำดับ จะพบว่าที่อุณหภูมิในการทอรีไฟร์ดังกล่าว มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่าสูงกว่า 1 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของทางปาล์มน้ำมันที่ผ่านจากการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเดินเตาปฏิกรณ์

ดังนั้นเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชั่นสำหรับทางปาล์มน้ำมัน โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับทางปาล์มน้ำมัน จะพบว่าอุณหภูมิในการทอรีไฟร์ 280 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด จะให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสูงสุดเท่ากับ 1.244 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับทางปาล์มน้ำมันที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 24.4 % ในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 230 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 4.55 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นสำหรับทางปาล์มน้ำมัน

4.2.4.6 สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับทางปาล์มน้ำมัน

สำหรับทางปาล์มน้ำมัน อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์ด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงโดยการพิจารณาลักษณะสีและผลได้เชิงมวลจะพบว่า สำหรับทางปาล์มน้ำมันนั้น อุณหภูมิที่

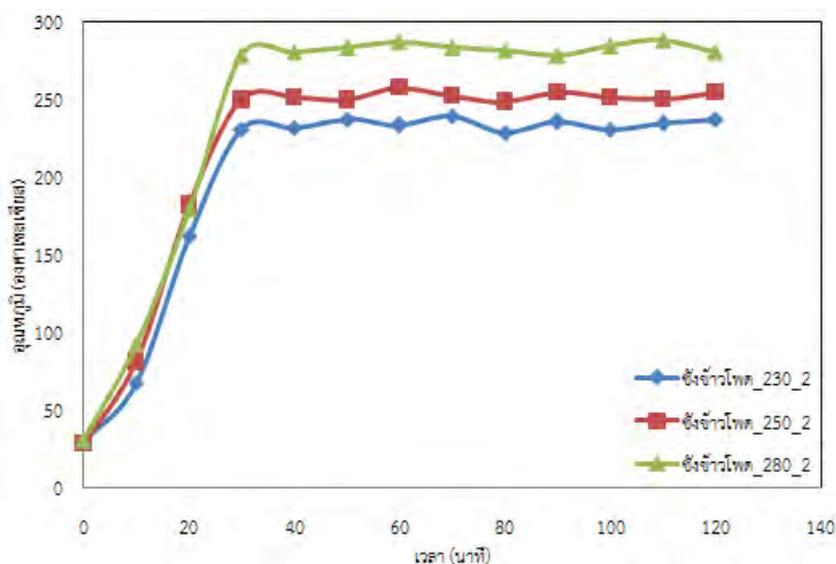
เหมาะสมสำหรับการทอรีไฟร์คืออุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอรี 0 2 แพลกซ์ จะพบว่าอุณหภูมิสำหรับการทอรีไฟร์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อ 0 พิจารณาจากด้านความสม่ำเสมอและความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเวลาการทอรีไฟร์ ชั่วโมง 2 จะพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์คือ 28 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด 0 ซึ่งผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.588 ค่าความร้อนเท่ากับ 26.90 MJ/kg และประสิทธิภาพทอรีไฟร์แพลกซ์สูงสุดเท่ากับ 1.244 แสดงว่า สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับทางปาล์มน้ำมันที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 24.4 %

4.2.5 กรณีซังข้าวโพด

4.2.5.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีไฟร์แพลกซ์

รูปที่ 4.56 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในส่วนทอรีไฟร์แพลกซ์ของเตาปฏิกรณ์ที่ พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับซังข้าวโพด ที่อุณหภูมิทอรีไฟร์แพลกซ์ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีไฟร์แพลกซ์ 2 ชั่วโมง จากรูปจะพบว่าสำหรับทุกอุณหภูมิทอรีไฟร์แพลกซ์ ในเวลาที่กำหนดนั้น อุณหภูมิภายในส่วนทอรีไฟร์แพลกซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ภายในเวลา 30 นาที เนื่องจากท่อความร้อนชนิดท่ออวกาศความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในรับและส่งผ่านความร้อนจากส่วนห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีไฟร์แพลกซ์และถ่ายเทความร้อนให้แก่ซังข้าวโพด และสามารถยกระดับอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ และเมื่อคำนวณอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีไฟร์แพลกซ์จะพบว่าอยู่ในช่วง 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที) [34] [35] และเมื่อสังเกตอุณหภูมิภายในส่วนทอรีไฟร์แพลกซ์ ที่มีแนวโน้มคงที่ไม่สม่ำเสมอหลังจากค่าที่กำหนด เนื่องจากเตาแก๊สซีไฟเออร์รูปแบบโดนัท ไม่สามารถควบคุมและปรับปริมาณความร้อนของส่วนให้ความร้อนได้เสถียรดีเท่าที่ควร

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนโดยท่อความร้อนชนิดท่ออวกาศความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีไฟร์แพลกซ์และสำหรับกรณีซังข้าวโพดนั้น จำนวนท่อและครีบกกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีไฟร์แพลกซ์



รูปที่ 4.56 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้นต่างๆ ที่เวลาในการทอรีแพคชั้น 120 นาที

4.2.5.2 ลักษณะของซึ่งข้าวโพดเมื่อผ่านการทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.57 แสดงลักษณะของซึ่งข้าวโพดสดและซึ่งข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอรีแพคชั้นที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสตามลำดับ เวลาในการทอรีแพคชั้น 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 230 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซึ่งข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มเกือบทั้งหมด เมื่อปีบพบว่าซึ่งข้าวโพดมีความเปราะมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแพคชั้นอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซึ่งข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อปีบพบว่าซึ่งข้าวโพดมีความเปราะมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแพคชั้นอยู่ในระดับดี

ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 280 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมงพบว่าลักษณะซึ่งข้าวโพดที่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งหมด เมื่อปีบพบว่าซึ่งข้าวโพดมีความเปราะมาก ซึ่งสรุปได้ว่าความสม่ำเสมอของการทอรีแพคชั้นอยู่ในระดับดีเหมือนกับที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 250 องศาเซลเซียส

สำหรับลักษณะซึ่งข้าวโพดจะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทอรีแพคชั้น ซึ่งมีสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24, 36, 37]



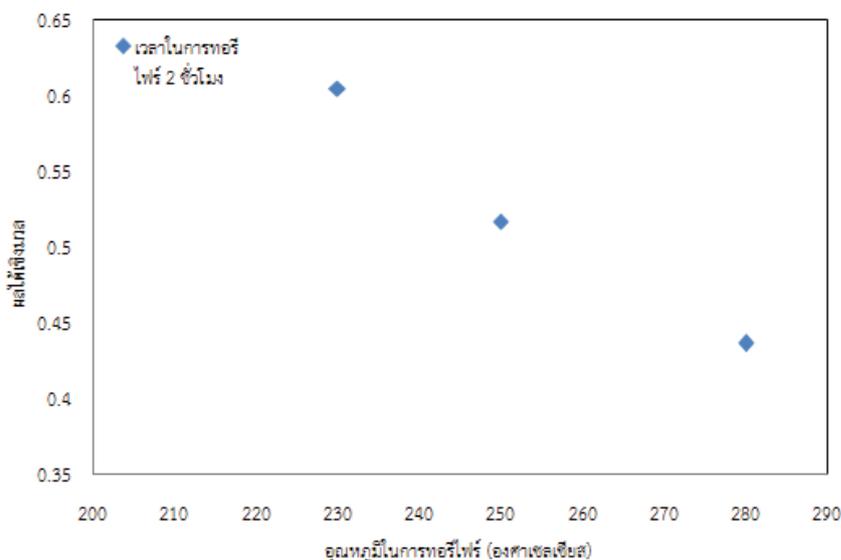
รูปที่ 4.57 ลักษณะของซังข้าวโพดที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆที่เวลา 2 ชั่วโมง

4.2.5.3 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวล

จากรูปที่ 4.58 แสดงผลของอุณหภูมิกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวล สำหรับซังข้าวโพดจากรูปแแกนตั้งแสดงผลได้เชิงมวล ซึ่งนิยามโดยผลหารของมวลแห้งสุดท้ายที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันต่อมวลแห้งเริ่มต้น แแกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส ผลได้เชิงมวลมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.605, 0.517 และ 0.436 ตามลำดับ ซึ่งผลได้เชิงมวลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากพอที่จะนำความร้อนจากผิวด้านนอกของอนุภาคเข้าสู่ด้านในของอนุภาคเพื่อทำปฏิกิริยาละลายตัว น้ำหนักของซังข้าวโพดที่สูญเสียไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอรีไฟร์ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายตัวของ Hemicelluloses ซึ่งเกิดการละลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200- 250°C ส่วนที่อุณหภูมิยิ่งสูงการละลายตัวยิ่งมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการละลายตัวของ cellulose กับ lignin บางส่วน คือ cellulose จะละลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-350°C ในขณะที่ lignin จะละลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 280-500°C[44]

ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการละลายตัวที่มีค่าสูงขึ้นตามด้วย ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลมีค่าลดลง[24] [39] และเมื่อพิจารณาสัดส่วนผลได้เชิงมวลในความหมายของความสม่ำเสมอในการละลายตัวของเหง้ามันสำปะหลัง เพื่อใช้กำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอรีแฟคชัน โดยพิจารณาจากผลได้เชิงมวลที่ดีที่สุดสำหรับการทอรีแฟคชันที่มีค่าประมาณ 0.7[19] จะพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 280 องศาเซลเซียสมีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



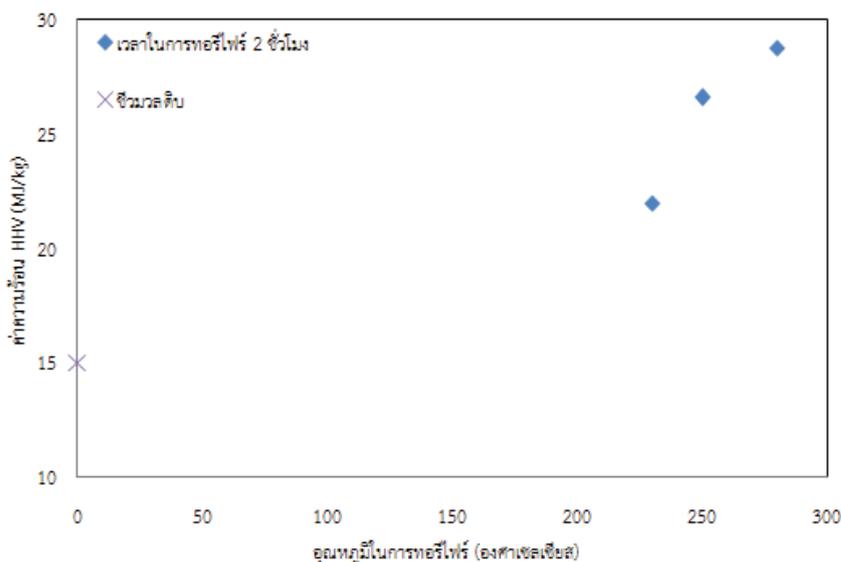
รูปที่ 4.58 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีไฟร์แพคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลสำหรับซังข้าวโพด

4.2.5.4 ผลของอุณหภูมิในการทอรีไฟร์แพคชั่นที่มีต่อค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.59 แสดงผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีไฟร์แพคชั่นที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพด จากรูปแกนตั้งแสดงค่าความร้อนที่ได้รับจากบอมแคลอรีมิเตอร์ แกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีไฟร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนจะมีค่า 21.96, 26.576 และ 28.76 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งที่อุณหภูมิในการทอรีไฟร์ดังกล่าว พบว่าค่าความร้อนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักๆขององค์ประกอบภายในซังข้าวโพด ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนที่สูญเสียไปในระหว่างปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สัดส่วนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟร์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 220-250 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ในช่วง 250 - 300 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงการสลายตัวของลิกนิน และเซลลูโลส[40, 41, 42] จากเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส สูงกว่าค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา[24] [43] อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสำหรับอุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียสด้วยเวลาในการทอรีไฟร์ 2 ชั่วโมงคิดเป็น 46.69%, 45.84% และ 68.52% เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของซังข้าวโพดดิบ

ดังนั้นอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีส่งผลต่อค่าความร้อนของซังข้าวโพด กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนของซังข้าวโพดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.59 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนสำหรับซังข้าวโพด

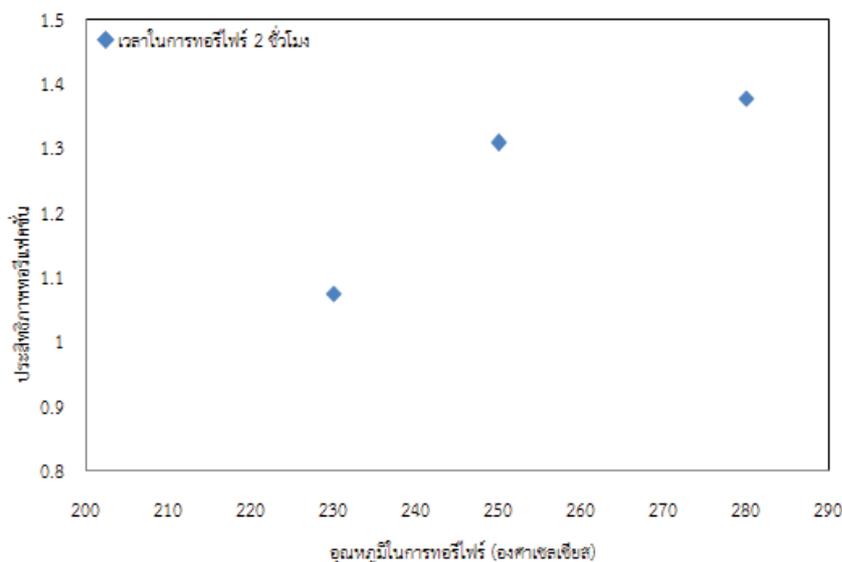
4.2.5.5 ผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน

รูปที่ 4.60 แสดงผลของอุณหภูมิในการทอรีแฟคชันที่มีต่อประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด จากรูปแกนตั้งแสดงประสิทธิภาพทอรีแฟคชัน โดยคิดจากผลหารของค่าความร้อนของซังข้าวโพดที่ผ่านจากการทอรีแฟคชันต่อผลรวมของค่าความร้อนของทางซังข้าวโพดดิบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง และแกนนอนแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีแฟคชัน (องศาเซลเซียส)

จากรูปที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับซังข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิช่วงต้นและกลางของกระบวนการ และจะเพิ่มขึ้นช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 280 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 230, 250 และ 280 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันจะมีค่า 1.074, 1.308 และ 1.376 ตามลำดับ จะพบว่าที่อุณหภูมิในการทอรีแฟคชันดังกล่าว มีประสิทธิภาพทอรีแฟคชันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าประสิทธิภาพทอรีแฟคชันจะมีค่าสูงกว่า 1 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนของทางซังข้าวโพดที่ผ่านจากการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด โดยพิจารณาประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสำหรับซังข้าวโพด จะพบว่าอุณหภูมิในการทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด ซึ่งประสิทธิภาพทอรีแฟคชันสูงสุดเท่ากับ 1.376 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของ

พลังงานสูงสุดสำหรับเหง้ำมันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 37.76 % ในขณะที่อุณหภูมิ 250 และ 230 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 4.60 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพทอร์แพคชันสำหรับชังข้าวโพด

4.2.5.6 สรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอร์ไฟร์สำหรับเหง้ำมันสำปะหลัง

สำหรับชังข้าวโพด อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอร์ไฟร์ด้วยเวลาในการทอร์ไฟร์ ชั่วโมง 2 โดยการพิจารณาลักษณะสีและผลได้เชิงมวลจะพบว่า สำหรับชังข้าวโพดนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทอร์ไฟร์คือ อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพทอร์แพคชัน จะพบว่า อุณหภูมิสำหรับการทอร์ไฟร์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้าน 0 ความสม่ำเสมอและความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงในการทอร์ไฟร์สำหรับเวลาการทอร์ไฟร์ ชั่วโมง 2 จะพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเดินเตาปฏิกรณ์คือ 28 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุด 0 ซึ่งผลได้เชิงมวลเท่ากับ 0.436 ค่าความร้อนเท่ากับ 28.76 MJ/kg และประสิทธิภาพทอร์แพคชันสูงสุดเท่ากับ 1.376 แสดงว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูงสุดสำหรับเหง้ำมันสำปะหลังที่ได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากับ 37.76 %

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะงานวิจัย

5.1 สรุปงานวิจัย

1. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 2 กิโลกรัมต่อครั้ง (อ้างอิงจากความหนาแน่นของไบออย) โดยการใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นจำนวน 5 ท่อ แต่ละท่อจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.5 เซนติเมตร และมีส่วนทำระเหย 50 เซนติเมตร ส่วนควบแน่น 60 เซนติเมตร สารทำงานที่ใช้คือ DOWNTHERM A โดยอัตราการเติมสาร 50%

2. กลไกการส่งผ่านความร้อนโดยการใช้ท่อความร้อนชนิดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถใช้งานได้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชั่นได้ จำนวนท่อและครีบกระจายความร้อนที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปยังส่วนทอรีแฟคชั่น และอัตราการทำความร้อนในส่วนทอรีแฟคชั่นมีค่าเท่ากับ 7.67, 8.33 และ 9.33 องศาเซลเซียสต่อนาทีตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามช่วงอัตราการทำความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (<50 องศาเซลเซียสต่อนาที)

3. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งชีวมวลลักษณะไม้ (Woody biomass) และชีวมวลนอกลักษณะไม้ (Non-woody biomass)

4. สำหรับลักษณะชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟร์จะมีสีเข้มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการทอรีแฟคชั่น

5. ผลได้เชิงมวลของชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟร์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ ในลักษณะของกราฟโค้งหงาย

6. ค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟร์จะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทอรีไฟร์ ในลักษณะของกราฟโค้งคว่ำ

7. ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น จะมีค่ามากกว่า 1 เมื่อค่าความร้อนของชีวมวลที่ได้จากการทอรีไฟร์สูงกว่าพลังงานที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่น ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่นจะมีค่าต่ำกว่า 1 เมื่อค่าความร้อนของชีวมวลที่ได้จากการทอรีไฟร์ต่ำกว่าพลังงานที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่น

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

1. สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์การใช้งานท่ออวกาศความร้อนในการจัดการทางความร้อนสำหรับเตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั้นแบบฟิวชั่นเบด ซึ่งพบว่าเตาปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้จริงในกระบวนการทอรีแพคชั้นได้ แต่พบว่าข้อด้อยเตาปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นคือ มีกำลังการผลิตที่น้อย และไม่สามารถผลิตได้ต่อเนื่อง ดังนั้นควรมีการประยุกต์ใช้งานท่ออวกาศความร้อนในเตาปฏิกรณ์อื่นเพื่อมีกำลังผลิตที่มากขึ้นและสามารถผลิตได้ต่อเนื่อง

2. สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั้นแบบฟิวชั่นเบดเพื่อประยุกต์การใช้งานในการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลของกระบวนการทอรีแพคชั้นเท่านั้น ซึ่งจะไม่ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของท่ออวกาศความร้อนและการกระจายความร้อนภายในส่วนของทอรีแพคชั้นในเตาปฏิกรณ์นี้

3. สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอประสิทธิภาพทอรีแพคชั้น เพื่อใช้ในการหาสถานะเงื่อนไขการทอรีแพคชั้นที่เหมาะสมในลักษณะของการประยุกต์การใช้งานจริง และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด สำหรับการศึกษาสถานะเงื่อนไขการทอรีแพคชั้นที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลทั้ง 5 ชนิด เกิดขึ้นเตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั้นแบบฟิวชั่นเบดพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้ท่ออวกาศความร้อนเท่านั้น ยังไม่มีการหาสถานะเงื่อนไขการทอรีแพคชั้นที่เหมาะสมในเตาปฏิกรณ์ชนิดอื่นๆ

รายการอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน (2009), “ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552.” เข้าถึงเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2555. ได้รับมาจาก
http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130:2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68
- [2] Tumuluru J.S., Wright C.T., Shahab Sokhansanj S. (2011). “Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development.” In **2011 Annual ASABE International Meeting**, 2011; 8; 115-154.
- [3] Acharya B, Idris Sule I, and Dutta A. (2012). “A review on advances of Torrefaction technologies for biomass processing”. **Biomass Conv. Bioref** 2012; 2:349–369.
- [4] Tumuluru J.S., Sokhansanj S. et al. “A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications.” **Industrial Biotechnology** 201; 8: 113-132.
- [5] Kleinschmidt K. (2011). “Overview of international developments in torrefaction”. Central European Biomass Conference 2011. Accessed May 30, 2012. Available from
http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2011_graz_torrefaction/Kleinschmidt_Paper.pdf
- [6] Bourgois J and Doat J. (1984). “Torrefied Wood from Temperate and Tropical Species: Advantages and Prospects.” **Bioenergy** 1984, 3: 153–159.
- [7] Jaap Kiel. (2007). “Torrefaction for biomass upgrading into commodity fuels”. IEA Bioenergy Task 32 workshop “Fuel storage, handling and preparation and system analysis for biomass combustion technologies”. Berlin, May 2007. Accessed May 30, 2012. Available from
http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_Berlin_ws_system_perspectives/03_Kiel.pdf
- [8] Arcate, J.R. (2002). “Global markets and technologies for torrefied wood in 2002”. **Wood Energy**, 5, pp. 26-28

- [9] Jaap Kiel. (2011). “ECN’s torrefaction - based BO2 - technology - from pilot to Demo”. Presented at IEA Bioenergy work shop torrefaction. Graz, Austria; 2011. Accessed June 14, 2012. Available from <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2011/m11024.pdf>
- [10] Fuels IE. (2008). “torrefied wood”. Roxboro, NorthCarolina; 2008. Accessed June 14, 2012 Available from <http://www.integrofuels.com/production.html>
- [11] Faghri A. (1995). **HEAT PIPE SCIENCE AND TECHNOLOGY**. Tayloy & Francis.1995
- [12] Basu P. (2010). **Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory**. Oxford: Elsevier; 2010. p. 1-359.
- [13] สถาบันพลังงานญี่ปุ่น. (2008). “คู่มือสารชีวมวลเอเชีย.” เข้าถึงเมื่อ 8 พฤษภาคม 2555. ได้รับมาจาก http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Thai/All_T.pdf
- [14] นคร ทิพยวงศ์. (2522). **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. พิมพ์ครั้งที่: 1 (2522). สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- [15] Accessed June 14, 2012. Available from <http://teenet.cmu.ac.th/emac/journal/2002/16/04.php>
- [16] Mitchell D and Elder T. (2010). “Torrefaction? What’s that?”. 2010 Council on Forest Engineering Annual Meeting. Auburn, Alabama: Fueling the Future; 2010. Accessed June 25, 2012. Available from http://www.biomassinnovation.ca/pdf/Report_Torrefaction_WhatsThat_Jan2010.pdf
- [17] Bergman P.C.A., Boersma A.R. et al. (2005). “Torrefaction for Entrained-Flow. Gasification of Biomass”. Energy research Centre of the Netherlands. (2005). Accessed June 25, 2012. Available from <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05067.pdf>
- [18] Verhoeff F, Adell A, et al. (2005). “Solid bioenergy carriers from biomass and waste”. Energy research Centre of the Netherlands 2005. Accessed June 25, 2012. Available from <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05086.pdf>
- [19] Bergman P.C.A., Boersma A.R., et al. (2005). “Torrefaction for biomass Co - firing in existing coal-fired power stations”. Energy research Centre of the Netherlands 2005. Accessed June 25, 2012. Available from <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05013.pdf>
- [20] Jun W.G., Hao L.Y., et al. (2011). “Pretreatment of biomass by torrefaction.” **Chinese Science Bull May 2011; 7: 1442 - 1448.**

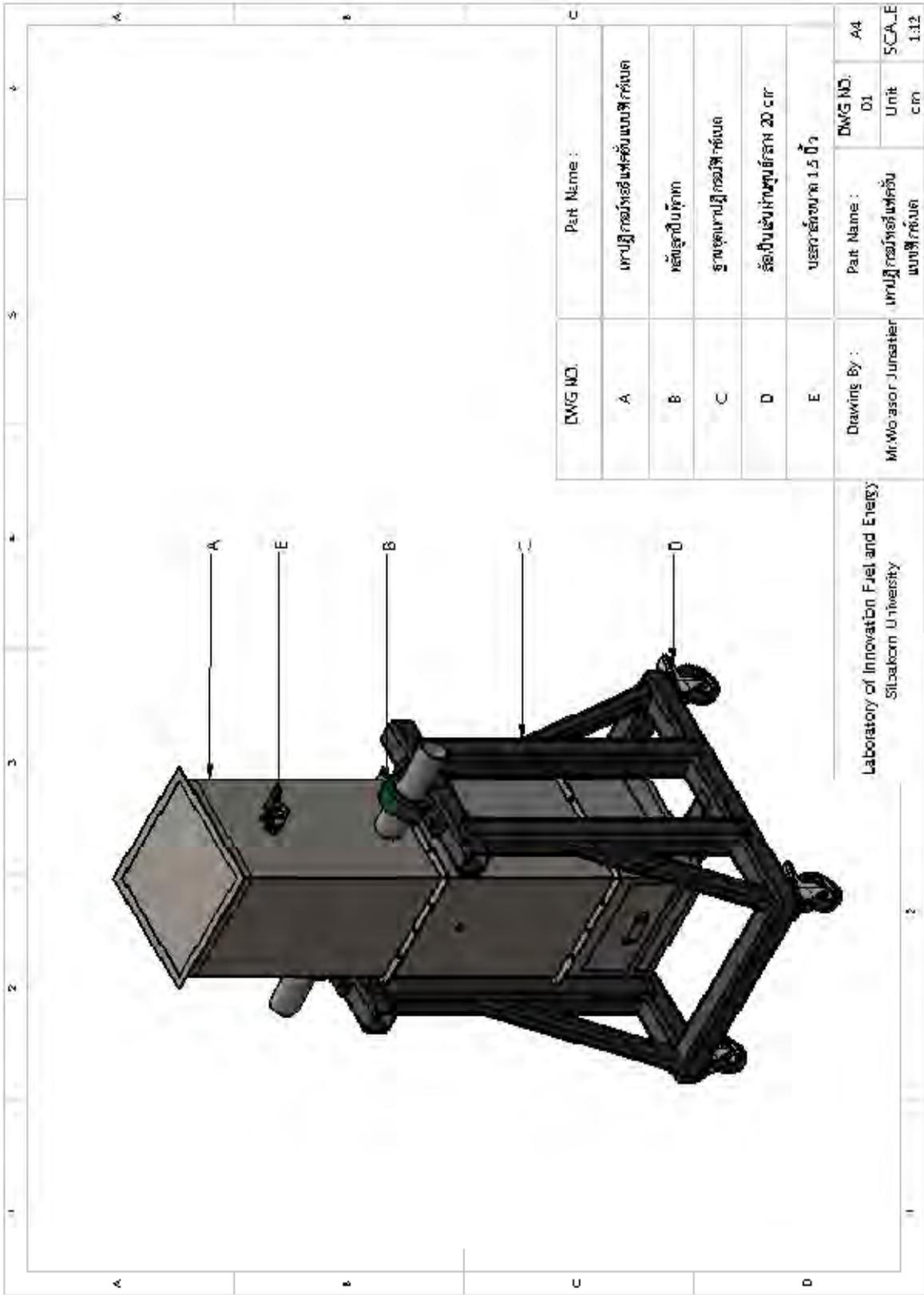
- [21] Chen W.H., Hsu H.C., et al. (2011). "Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass." **Energy** 2011; 36: 3012-3021.
- [22] Medic D., Darr M., et al. (2012). "Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading." **Fuel** 2012; 91: 147-154.
- [23] Rousset P., Aguiar C., et al. (2011). "Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction." **Bioresource Technology** 2011; 7: 8225-8231.
- [24] Uemura Y., Omar W.N., et al. (2011). "Torrefaction of oil palm wastes." **Fuel** 2011; 7: 2585 - 2591.
- [25] Bridgeman T.G., Jones J.M., et al. (2010). "An investigation of the grindability of two torrefied energy crops." **Fuel** 2010; 89: 3911-3918.
- [26] Wang MJ, Huang YF et al. (2011). "Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues." **Energy** 2011; 37: 177-184.
- [27] Li H., Liu X., et al. (2012). "Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor." **Bioresource Technology** 2012; 103: 453-458.
- [28] Chew J.J. and Doshi V. (2011). "Recent advances in biomass pretreatment – torrefaction fundamentals and technology." **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 2011; 15: 4212-4222.
- [29] Beekes M and Cremers M. (2012). "Torrefaction Cracks the Biomass Challenge". *Renewable Energy World Magazine* 2012. Accessed June 25, 2012. Available from <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/06/torrefaction-cracks-the-biomass-challenge?page=2>
- [30] Kiel J.H.A., Verhoeff F., et al. (2008). "BO₂ - Technology for biomass upgrading into solid fuel – pilot - scale testing and Market Implementation." **16th European Biomass Conference & Exhibition**. Valencia, Spain: Energy research Centre of the Netherlands; June, 2008, p. 7.
- [31] Fuels IE. (2008). "torrefied wood". Roxboro, North Carolina; 2008. Accessed June 25, 2012. Available from <http://www.integrofuels.com/production.html>
- [32] Ontario Power generation. (2010). "Torrefaction treatment process". October 27, 2010. Accessed June 25, 2012. Available from <http://www.opg.com/power/thermal/October%2027%20%202010%20%20Torrefaction%20Treatment%20Process%20-%20Ag%20Steering%20Committee%20-%20Reinert.pdf>

- [33] Joe James. (2008). "Using Torrefied Wood as a Coal Replacement, for Superior Pellets and Cellulosic Ethanol Production". Agri-Tech Producers, LLC.2008. Accessed June 25, 2012. Available from https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.agri-techproducers.com%2Fupload%2FagriTechProducersTorrefactionPresentation.ppt&ei=B0FeUvCfMortrAfdiYHYAg&usq=AFQjCNG_QB7lToEbudisOIYxp4O95pYzKQ&sig2=jo979eTNVRUCviPROi9Zlg
- [34] Prins MJ. (2005). **Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction**. Eindhoven, Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven; 2005.
- [35] Prins M.J., Ptasiński K.J., and Janssen F.J.J.G. (2006). "More efficient biomass gasification via torrefaction." **Energy** 2006; 31: 3458-3470.
- [36] Couhert C., Salvador S., and Commandre J-M. (2009). "Impact of torrefaction on syngas production from wood." **Fuel** 2009; 88: 2286-2290.
- [37] Phanphanich M, and Mani S. (2011). "Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass." **Bioresource Technology** 2011; 102: 1246-1253.
- [38] Pimchuai A., Dutta A., and Basu P. (2010). "Torrefaction of Agriculture Residue to Enhance Combustible Properties." **Energy Fuels** 2010; 24: 4638-4645.
- [39] Bridgeman T.G., Jones J.M. et al. (2008). "Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties." **Fuel** 2008; 87: 844-856.
- [40] Li H., Liu X. et al. (2012). "Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets." **Applied Energy** 2012; 93: 680-685.
- [41] Prins M.J., Krzysztof J.P., and Janssen F.J.J.G. (2006). "Torrefaction of wood Part 1. Weight loss kinetics." **J. Anal. Appl. Pyrolysis** 2006; (77): 28-34.
- [42] Toscano G., Riva G. et al. (2013). "Effect of the carbon oxidation state of biomass compounds on the relationship between GCV and carbon content". **Biomass and Bioenergy** 2013; 48: 231-238.
- [43] Chen W.H., and Kuo P.C. (2011). "Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis". **Energy**, 2011; 36: 6451- 60.
- [44] Aziz M.A., Uemura Y., Sabil K.M. (2011). "Characterization of oil palm biomass as feed for torrefaction process". **National Postgraduate Conference (NPC)**, 2011.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายการแบบก่อสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั้นแบบพิกซ์เบตพร้อมระบบจัดการความร้อนโดยใช้
ท่อเกลือความร้อน

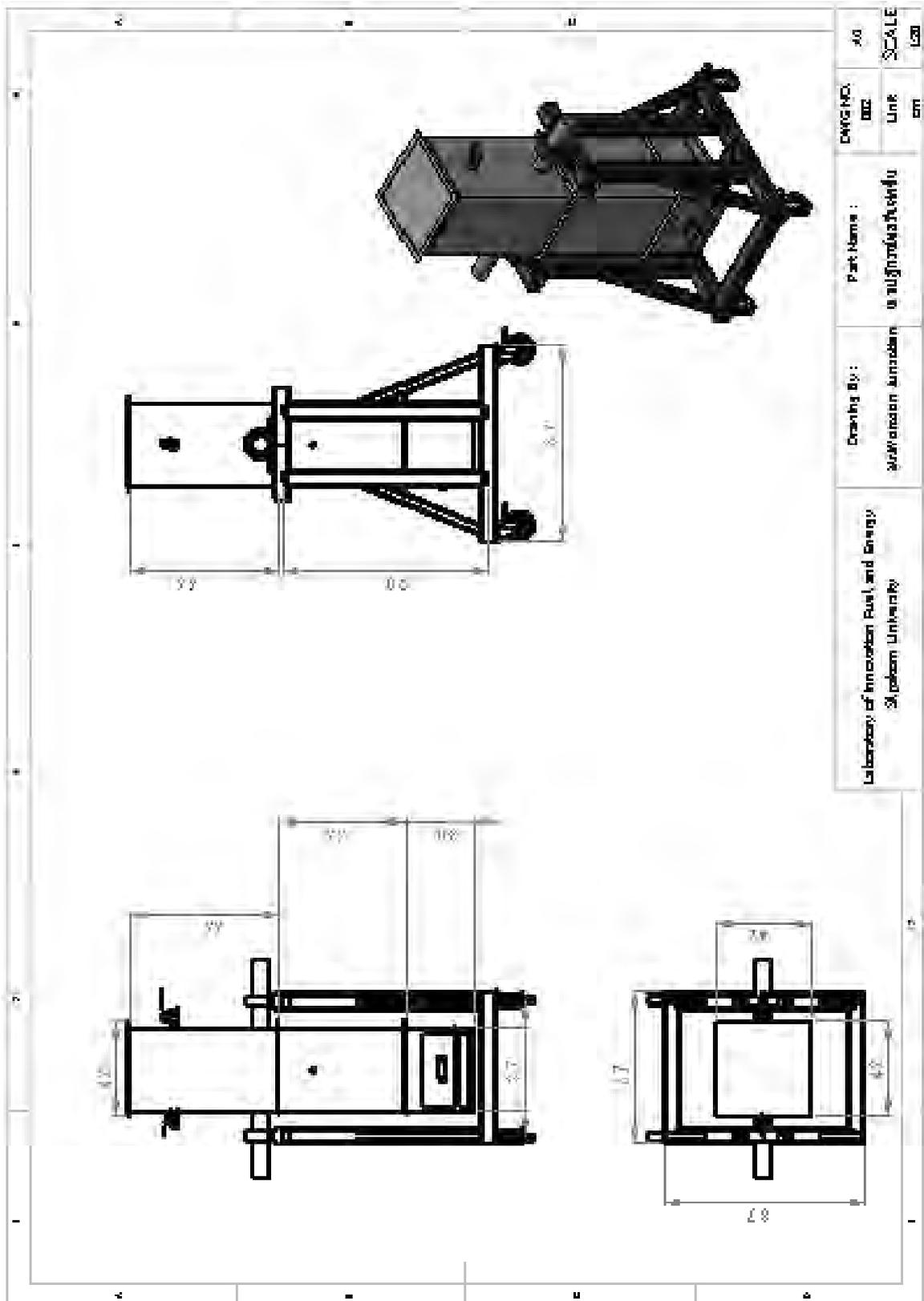


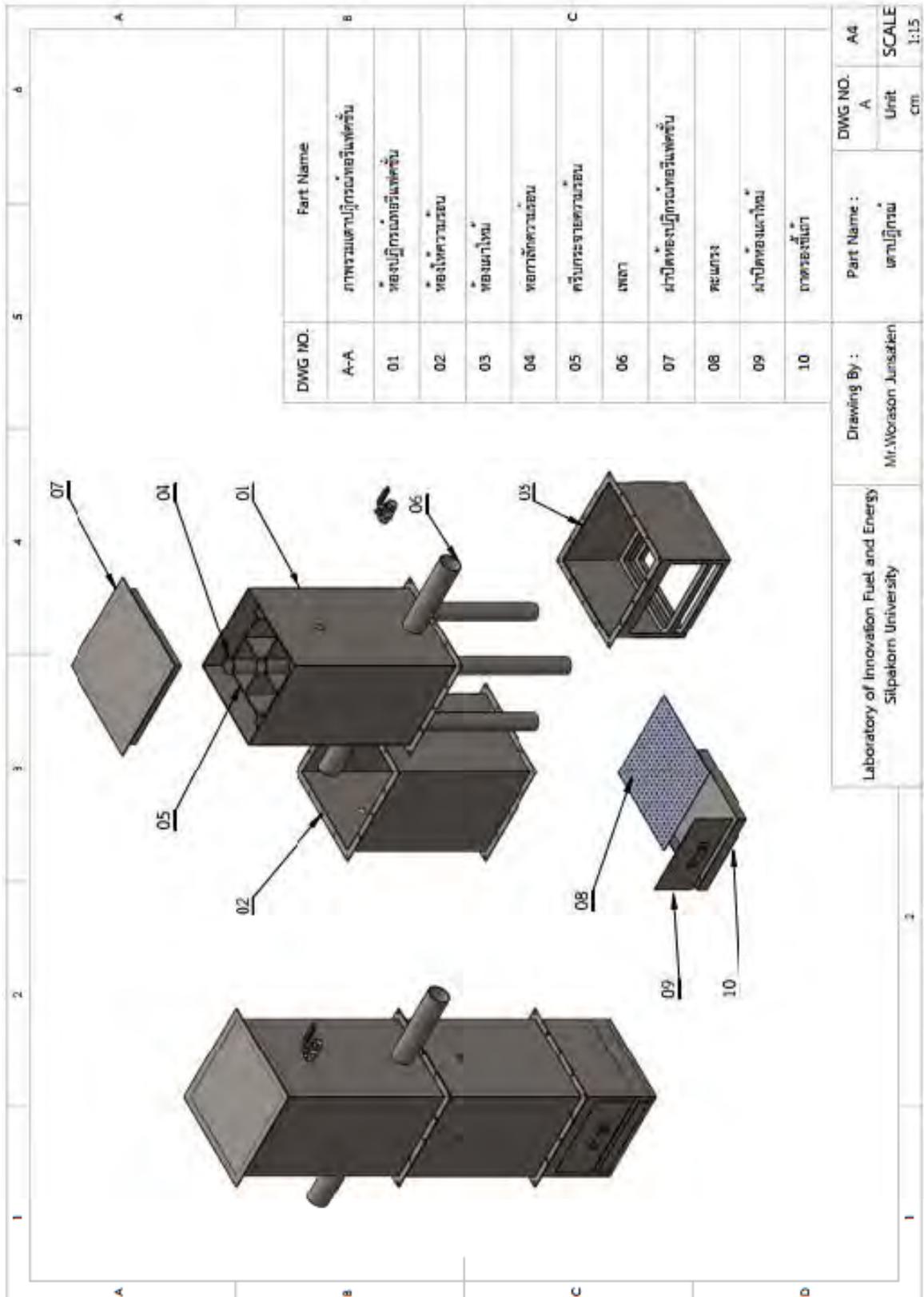
DWG NO.	Part Name :
A	แทงนํ้าแก๊สพร้อมไฟพร้อมแบบสีทองแดง
B	หัวแก๊สสีเงิน
C	ฐานชุดแทงนํ้าแก๊สพร้อมสีทองแดง
D	ล้อเป็นเส้นเหล็กขนาด 20 cm
E	บุรกล้อขนาด 1.5 นิ้ว

Drawing By :
Mr.Worator Junsathien

Laboratory of Innovation Fuel and Energy
Sittabokorn University

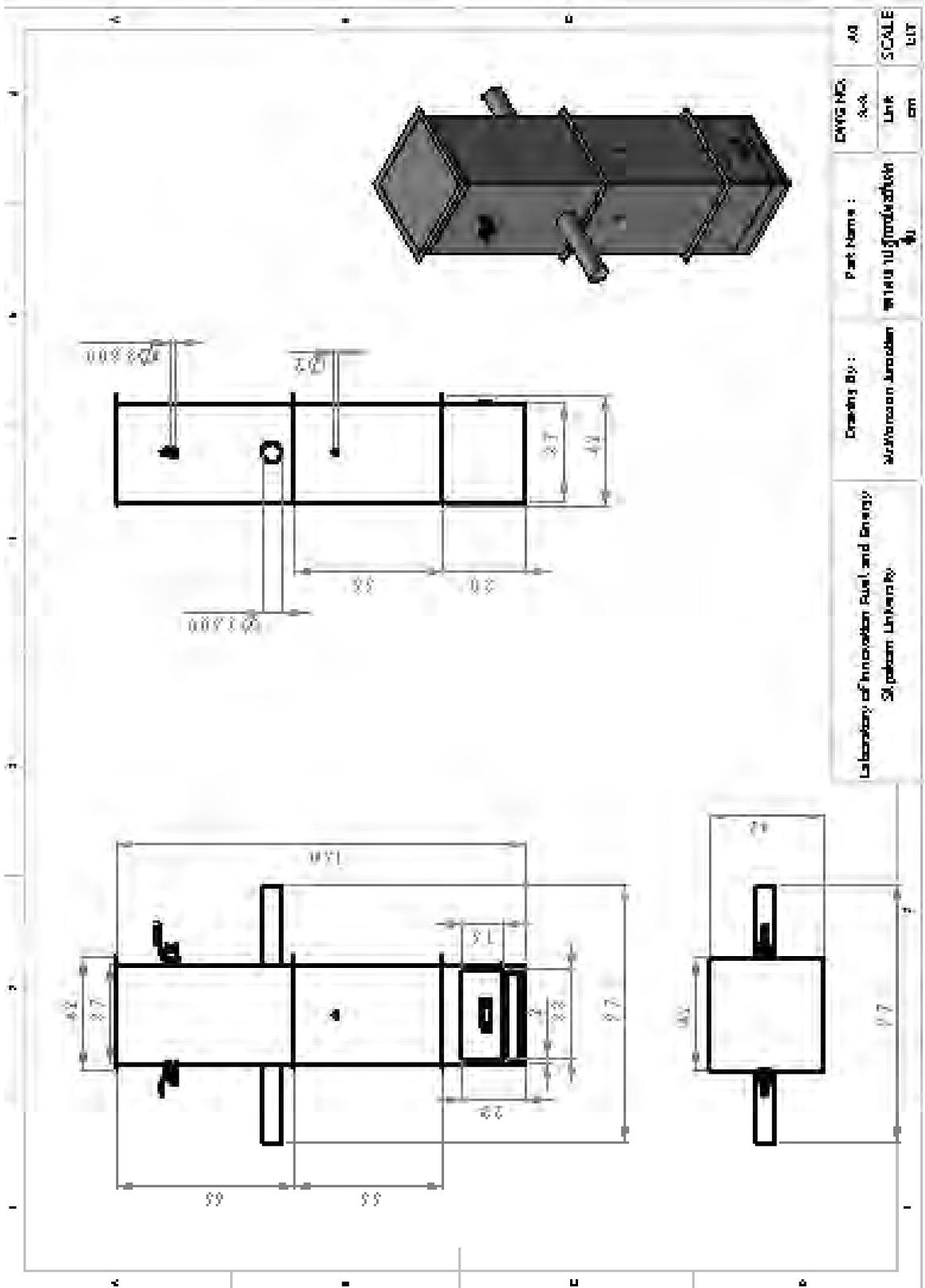
Part Name :	DWG NO.	A4
แทงนํ้าแก๊สพร้อมไฟพร้อมแบบสีทองแดง	D1	Unit
		cm
		SCALE
		1:12

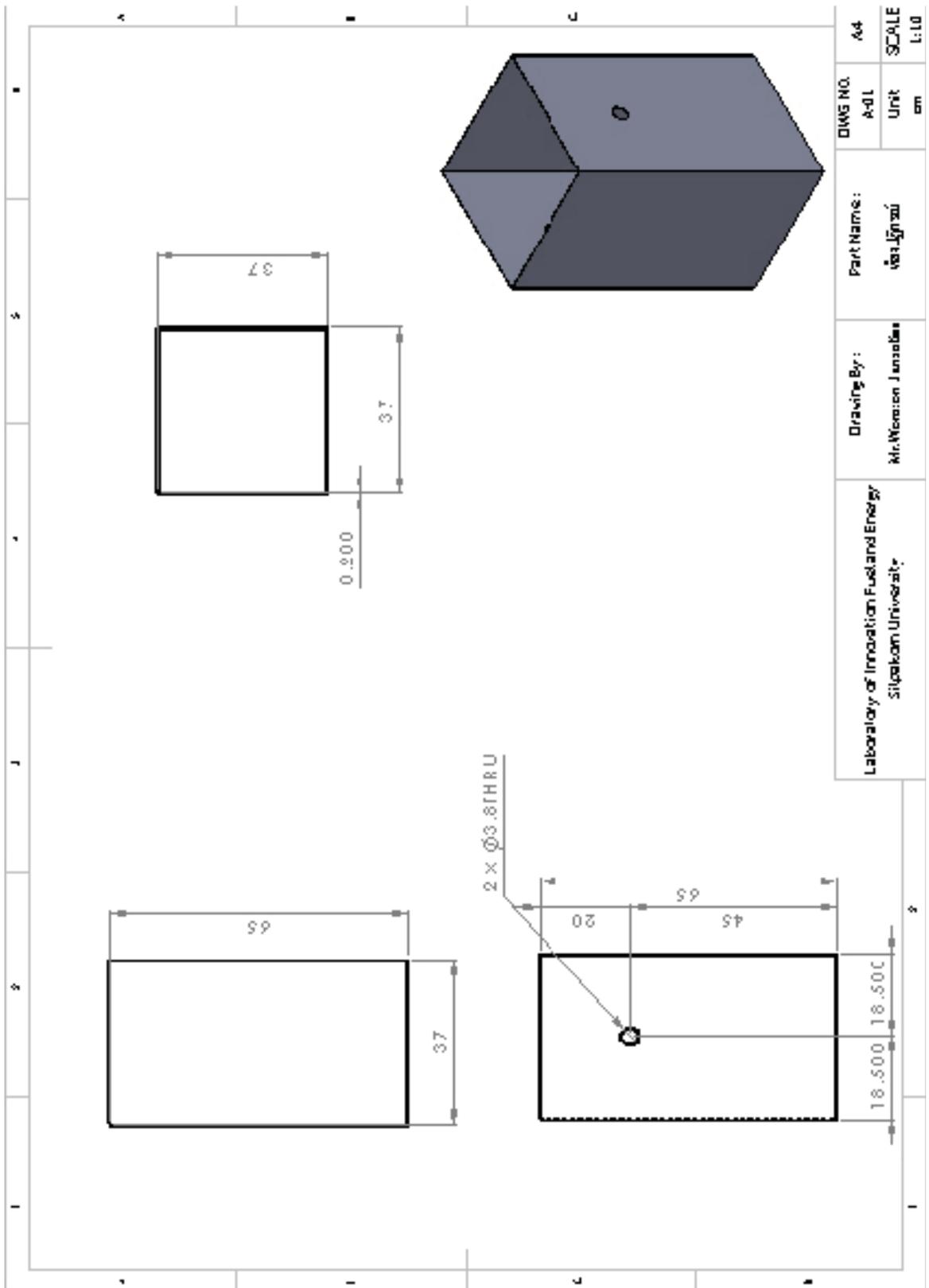




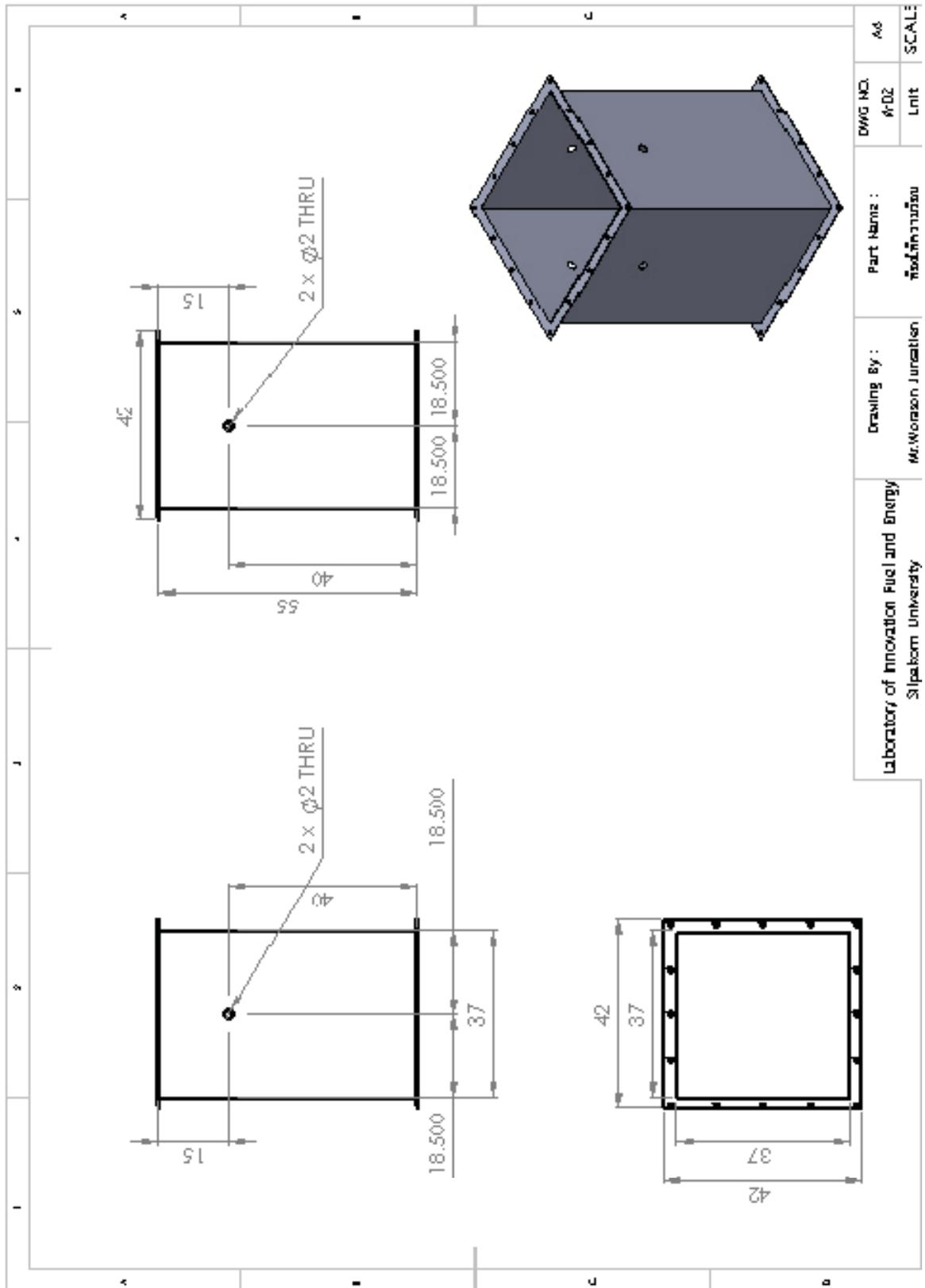
DWG NO.	Part Name
A-A	ภาพรวมระบบปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง
01	ห้องปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง
02	ห้องหุ้มความร้อน
03	ห้องน้ำใหม่
04	พัดลมระบายความร้อน
05	ตัวรับกระแสความร้อน
06	เพลา
07	ฝาปิดห้องปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง
08	แผงวงจร
09	ฝาปิดห้องน้ำใหม่
10	ถังบรรจุน้ำ

Drawing By : Mr.Worason Junsakien	Part Name :	DWG NO.	A4
	ระบบปฏิกรณ์	A	Unit
Laboratory of Innovation Fuel and Energy Silpakorn University		SCALE	1:15

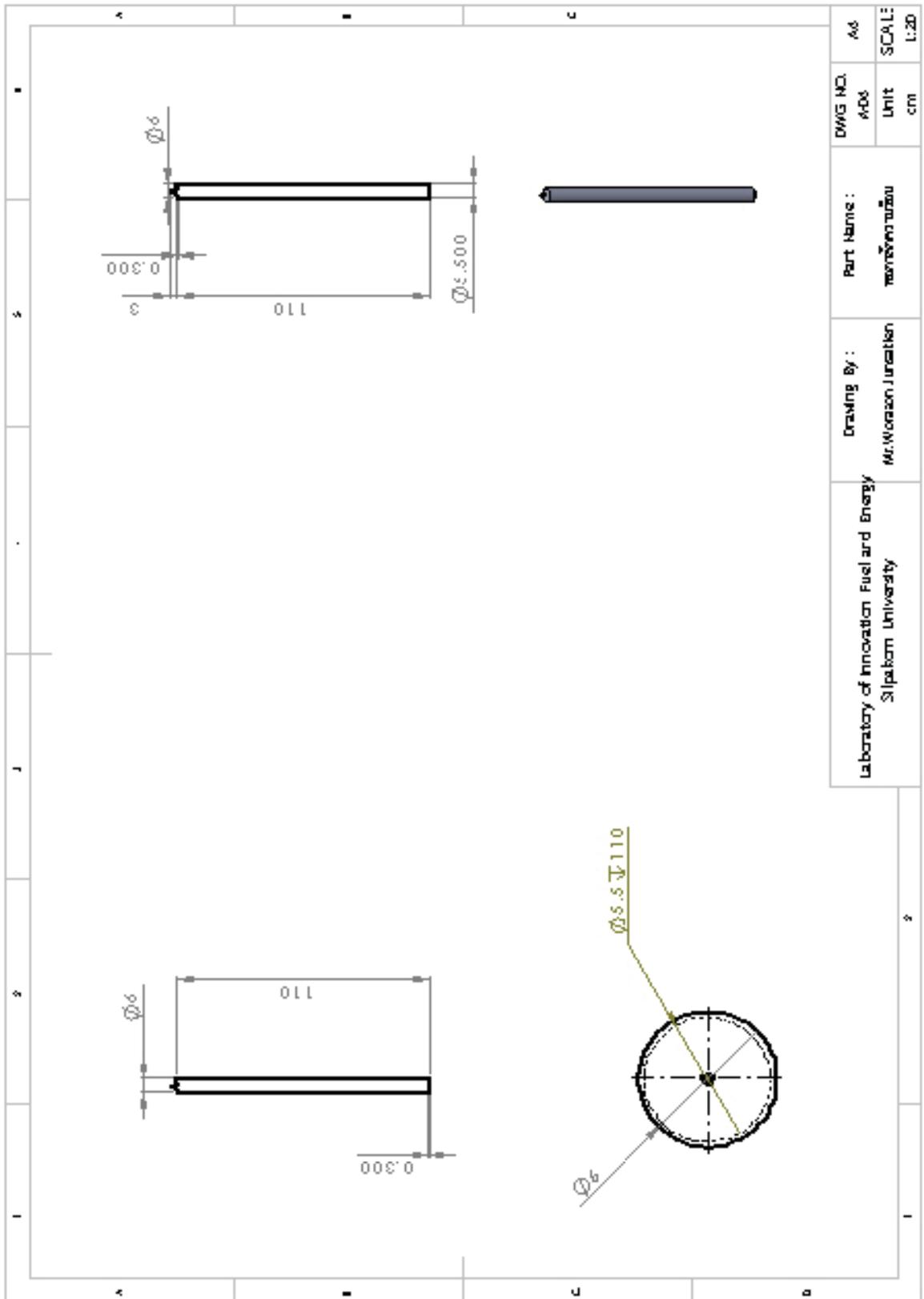


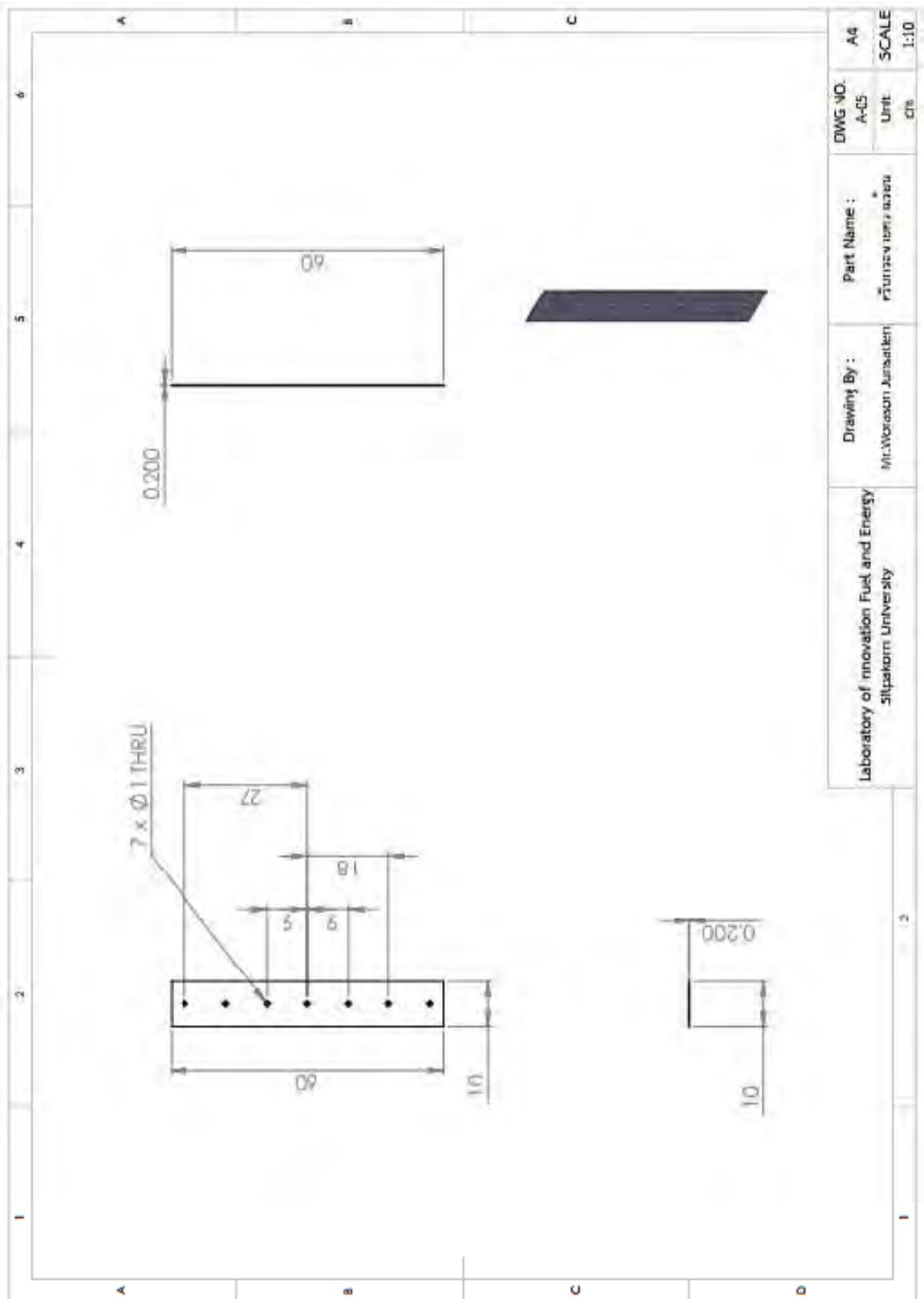


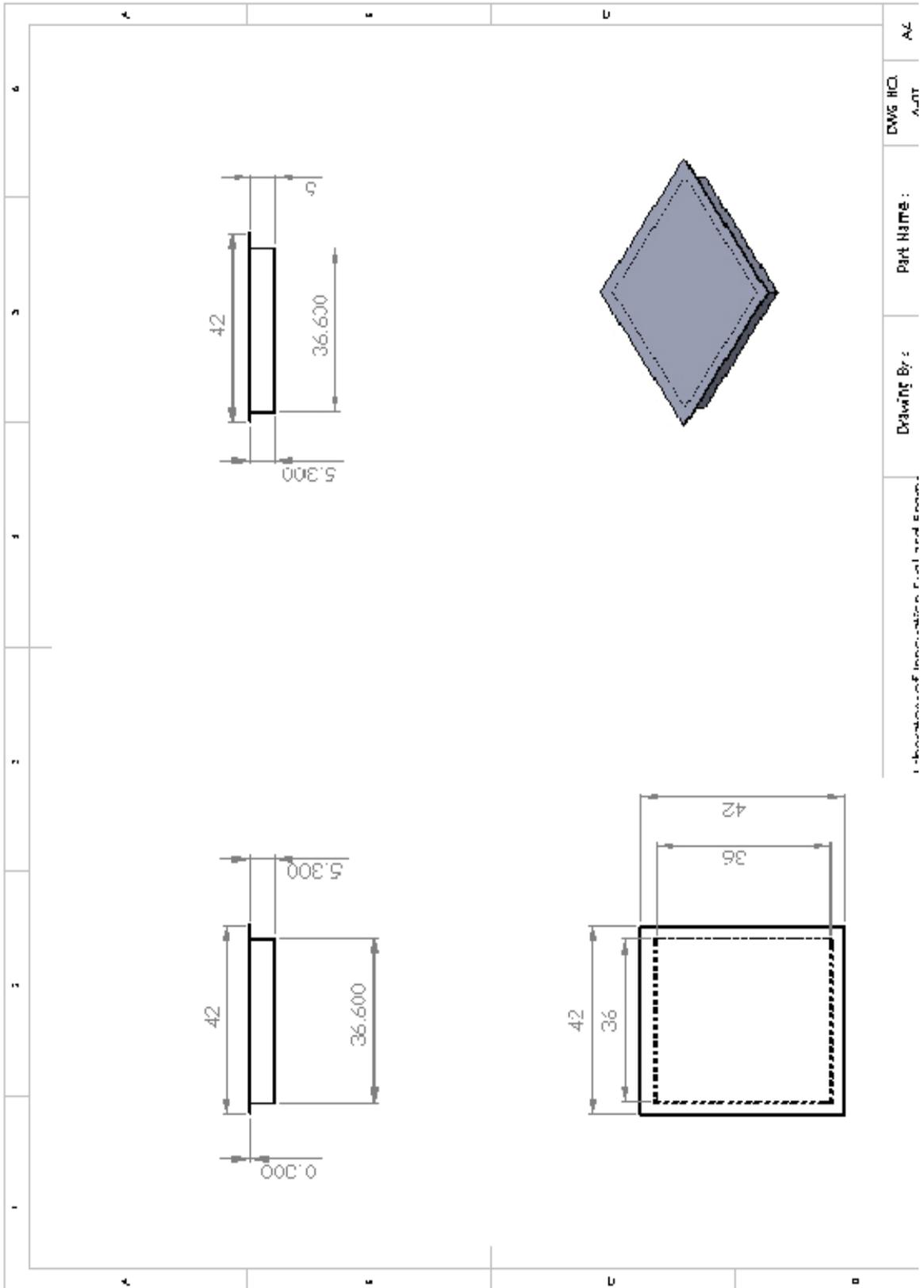
DWG NO.	A4
A-01	Unit
Unit	em
Part Name:	வாய்ப்பாடு
Drawing By:	Mr. Nimesh Jansaria
Laboratory of Innovation Fuel and Energy Sri Lanka University	
SCALE	1:10



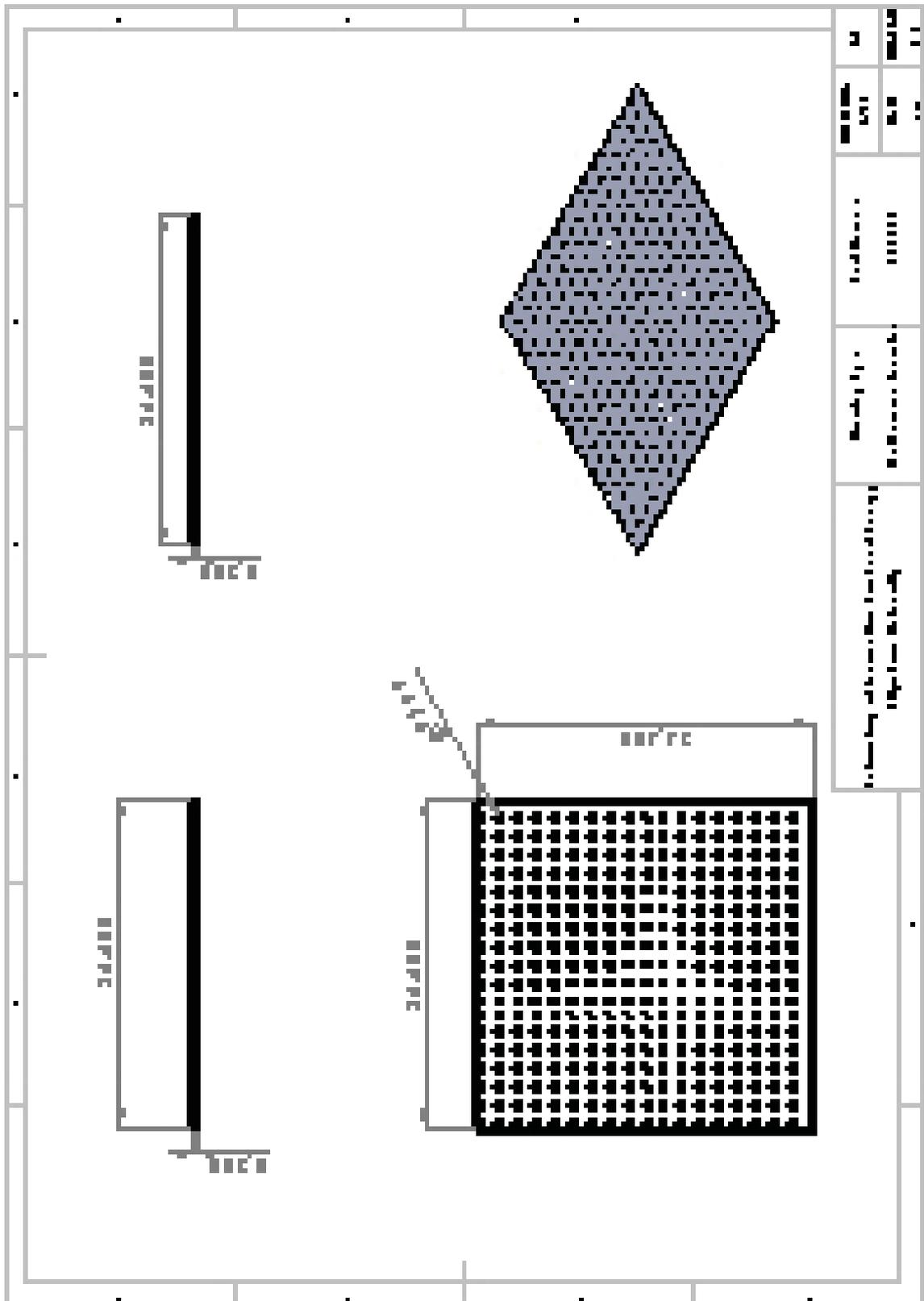
Laboratory of Innovation Fuel and Energy Sripaborn University		Drawing By : Mr. Worrason Jurnathien	Part Name : ถังเก็บแก๊ส	DWG NO. #02	Ad
				Unit	SCALE

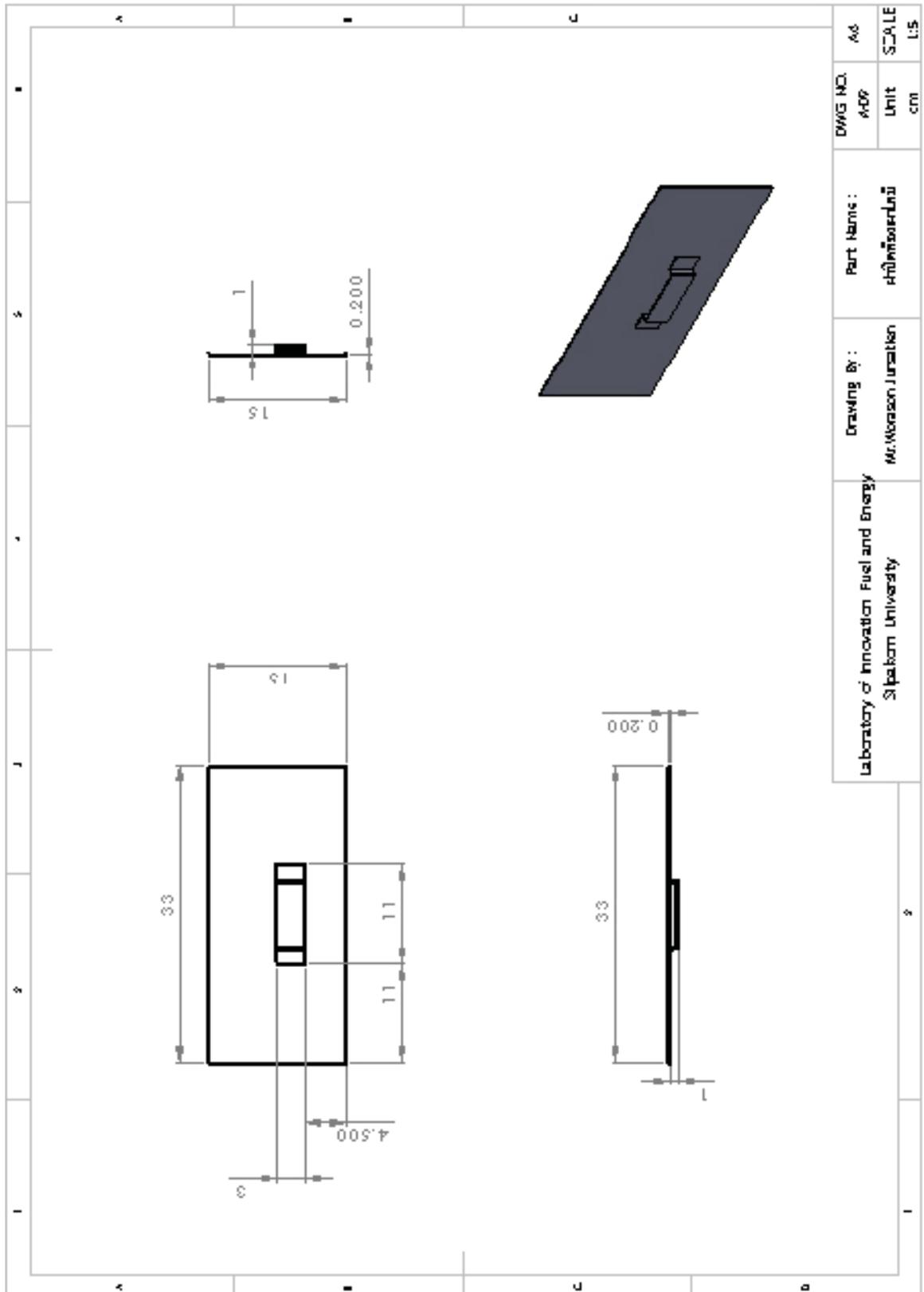




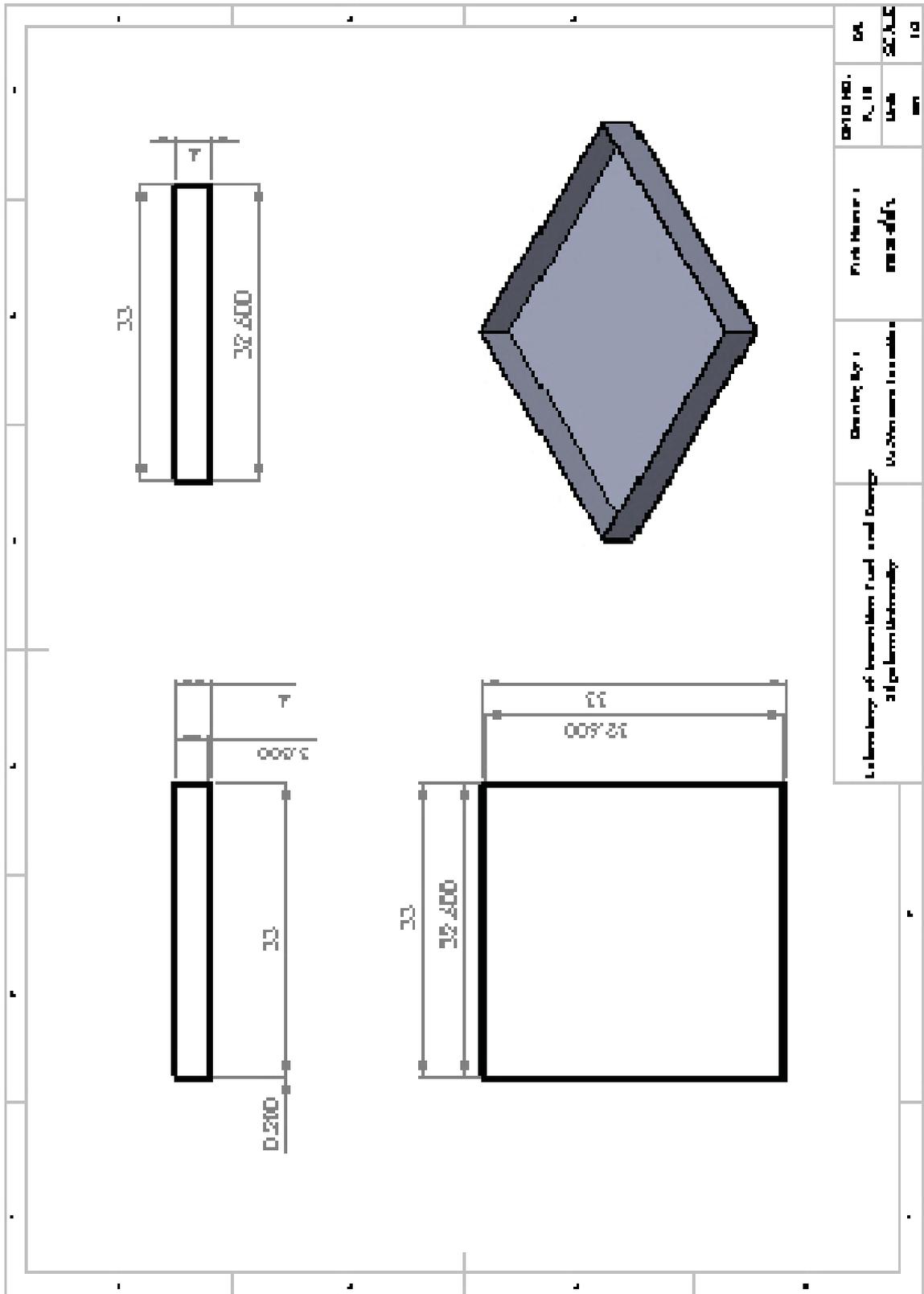


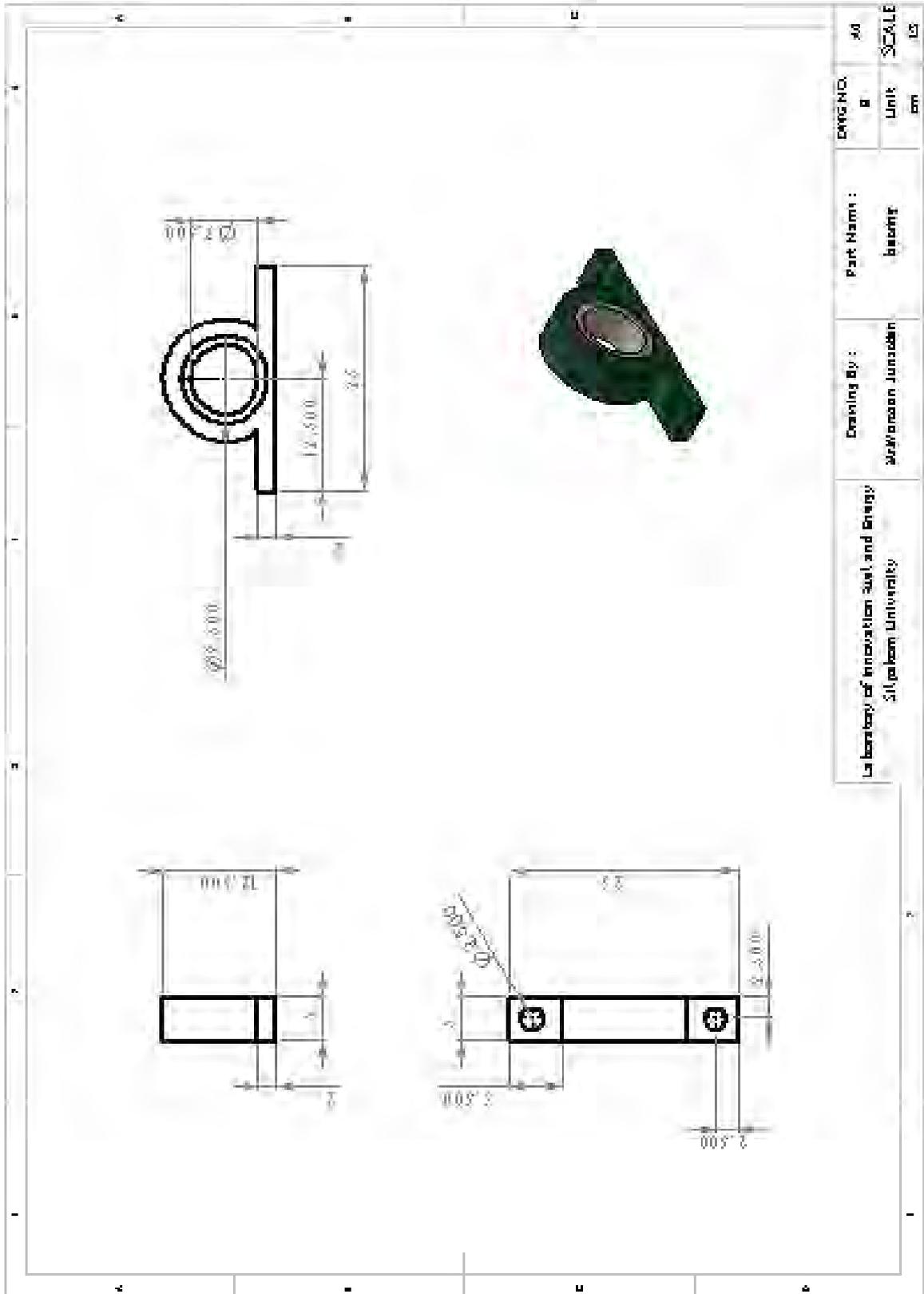
DWG NO. A-111
Part Name:
Drawing By:
Institution of Innovation, Fuel and Energy

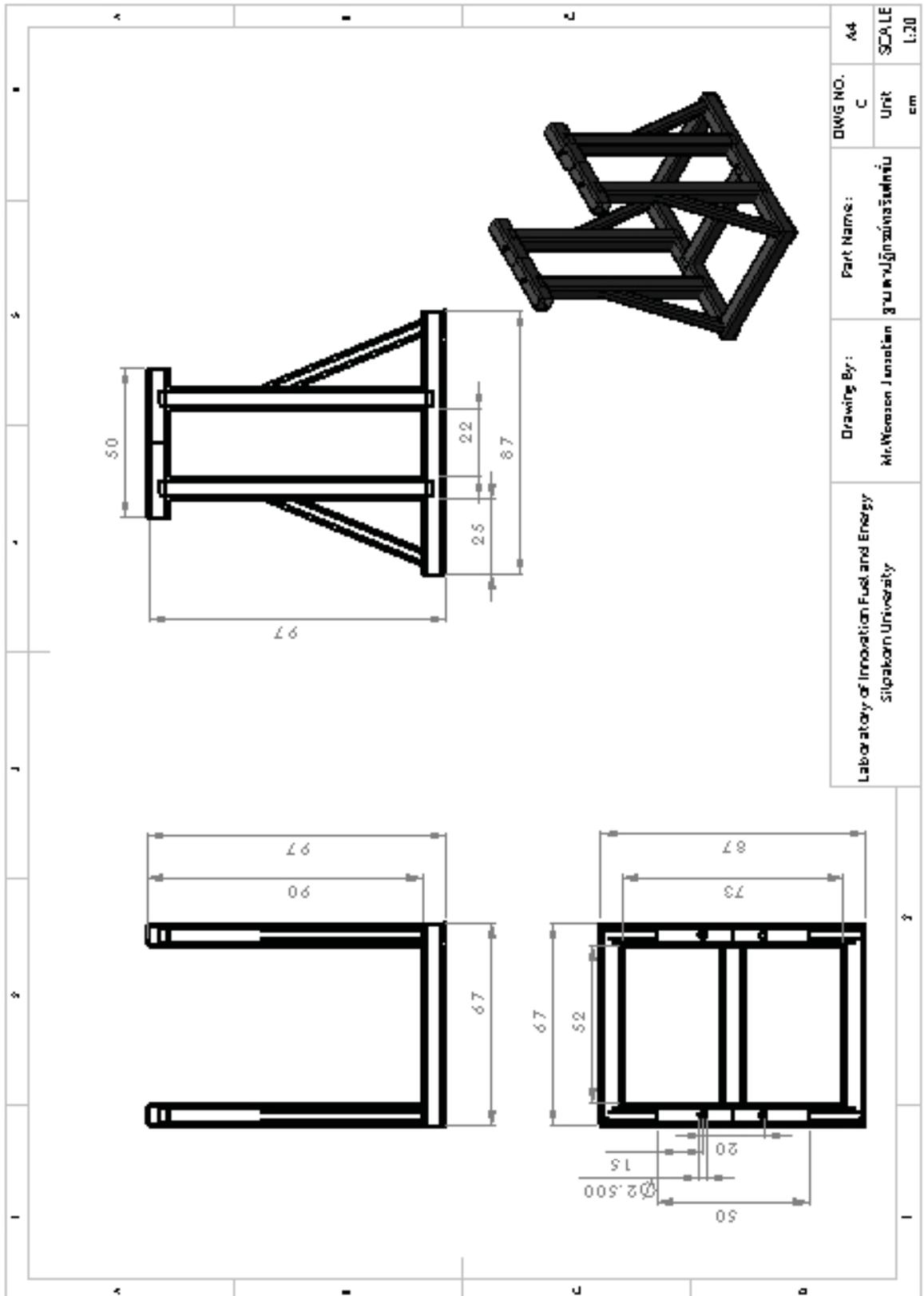




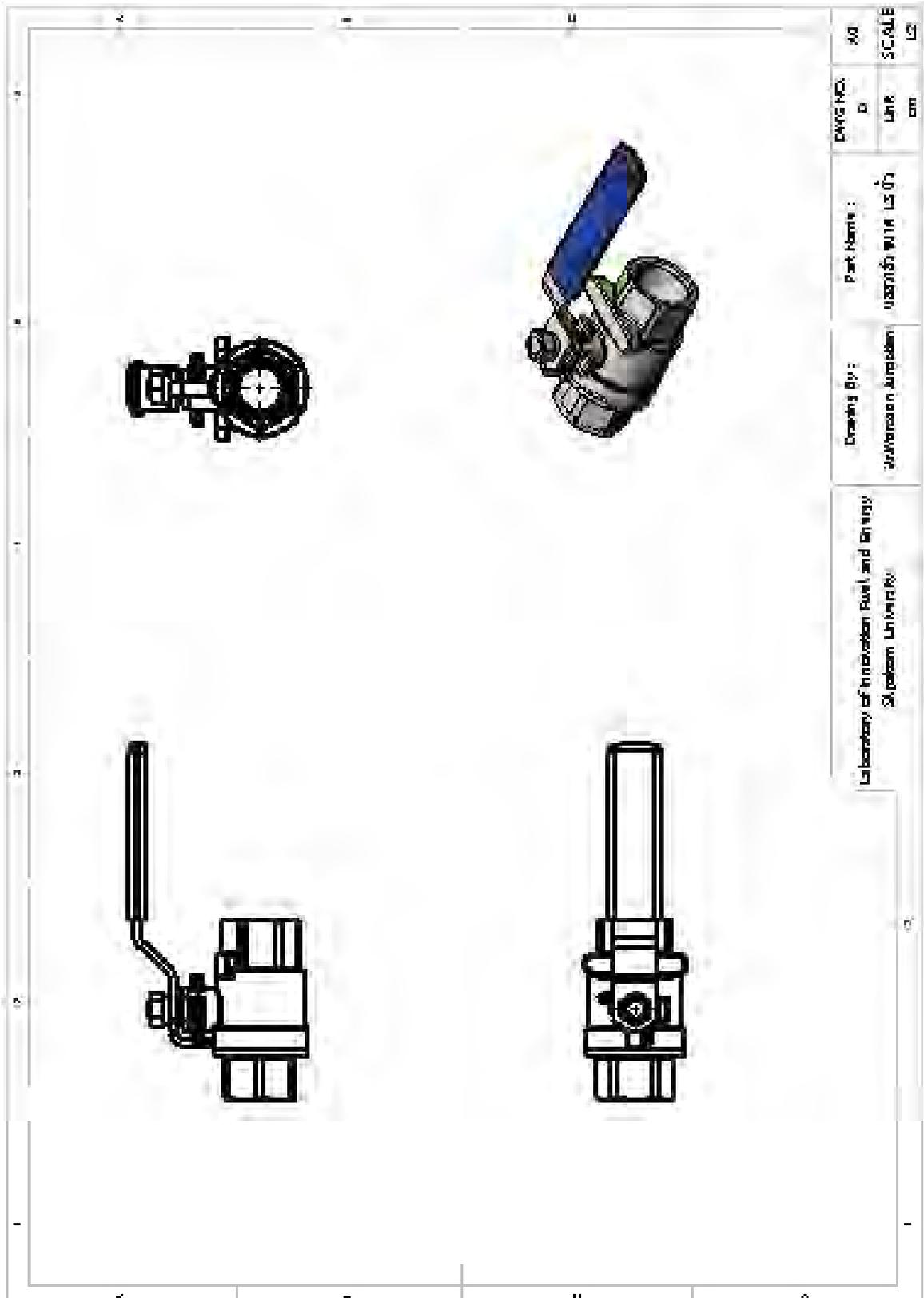
DWG NO. A-09	Part Name: Ammunition	Drawing By: Mr. Mowson Jursalin	Laboratory of Innovation Fuel and Energy Sipahkam University	DWG NO.	A-6
				Unit	cm
				SCALE	1:5



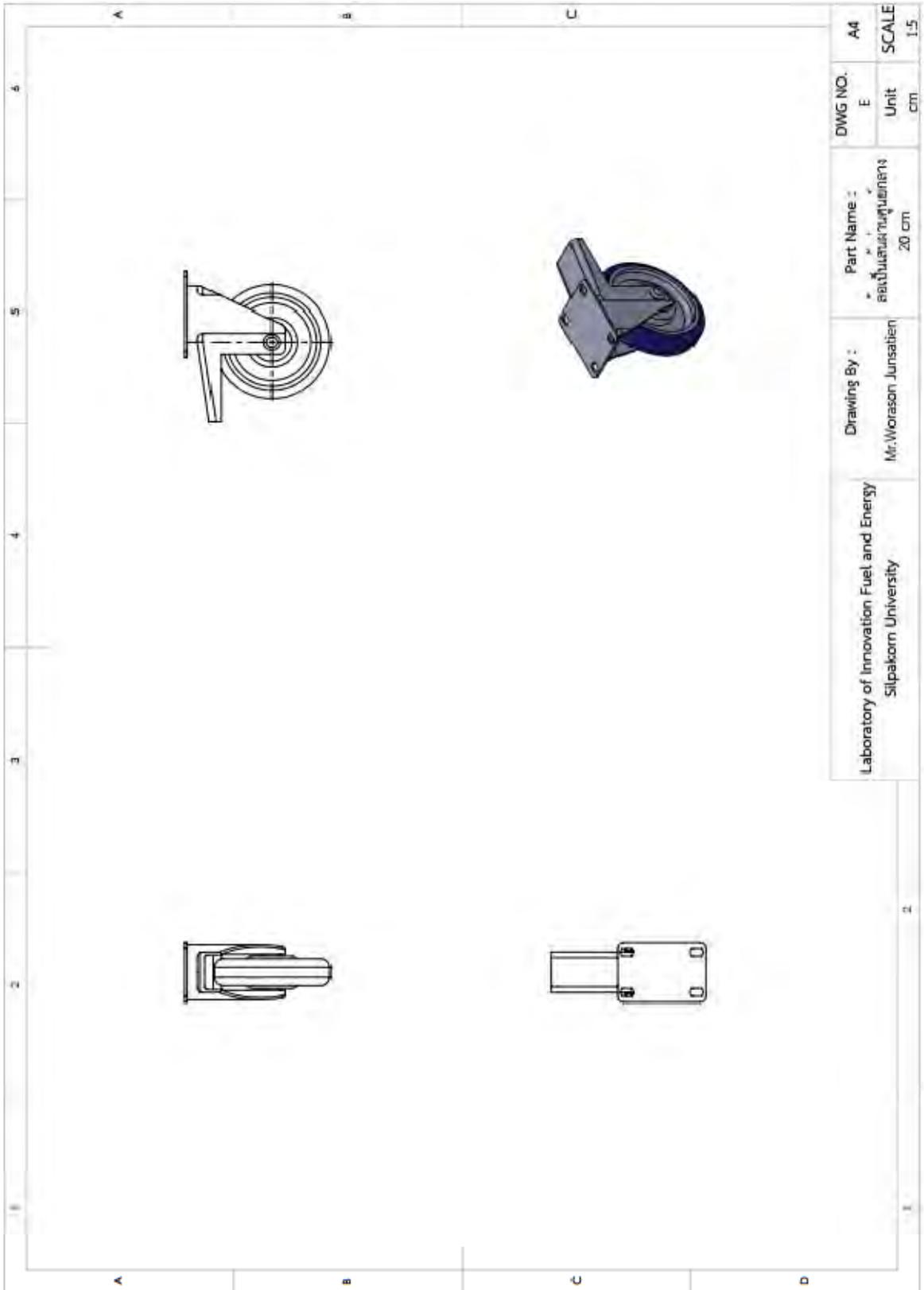




Laboratory of Innovation Fuel and Energy Sipahcom University	Drawing By:	Mr. Nomsan Jansatien	Part Name:	เก้าอี้โครงสแตนเลส	DWG NO.:	A4
					C	SCALE
					Unit	cm
						1:20



Lab: Laboratory of Innovation, Fuel, and Energy Sulaiman University	Drawing By: Jalalrezaan Jalalrezaan	Part Name: 0320701410114 US 07	DWG NO: D LINK cm	NO SCALE LS
--	--	-----------------------------------	----------------------------	-------------------



ภาคผนวก ข
ข้อมูลผลการทดลองงานวิจัย

กรณีศึกษาที่ 1 การใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง

ตาราง ก. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น

ตาราง ก - 1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับแห้งมันสำปะหลัง

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	31		0	28		0	28
	10	86		10	95		10	122
	20	180		20	194		20	201
	30	234		30	245		30	286
	40	234		40	254		40	285
	50	230		50	253		50	282
	60	230		60	250		60	283
	60	230		60	250		60	283
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 1.5 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	27		0	29		0	25
	10	98		10	90		10	120
	20	168		20	167		20	189
	30	228		30	250		30	276
	40	230		40	254		40	280
	50	232		50	252		50	280
	60	235		60	249		60	281
	70	234		70	250		70	285
	80	230		80	254		80	287
90	229	90	251	90	285			

ตาราง ก - 1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับแห้งมันสำปะหลัง (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 2.0 ชั่วโมง								
	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส			อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส			อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	
	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ		เวลา (นาท)	อุณหภูมิ		เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	31		0	31		0	25
	10	96		10	89		10	118
	20	172		20	180		20	207
	30	228		30	250		30	278
	40	231		40	253		40	281
	50	230		50	255		50	279
	60	230		60	254		60	281
	70	230		70	253		70	279
	80	230		80	251		80	286
	90	231		90	250		90	285
	100	233		100	250		100	284
	110	235		110	250		110	282
	120	232		120	250		120	280

ตาราง ก - 2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับใบและยอดอ้อย

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	31		0	31		0	28
	10	105		10	118		10	134
	20	185		20	192		20	223
	30	235		30	249		30	279
	40	233		40	256		40	281
	50	229		50	255		50	284
	60	230		60	252		60	280
	60	230		60	252		60	280
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.5 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	27		0	28		0	25
	10	104		10	113		10	115
	20	188		20	186		20	172
	30	230		30	248		30	280
	40	234		40	250		40	274
	50	230		50	250		50	286
	60	229		60	249		60	288
	70	231		70	251		70	282
	80	233		80	254		80	281
90	231	90	253	90	280			

ตาราง ก - 2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับใบและยอดอ้อย (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 2.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	31		0	31		0	25
	10	101		10	122		10	123
	20	168		20	220		20	224
	30	223		30	254		30	281
	40	235		40	255		40	283
	50	235		50	255		50	280
	60	230		60	249		60	284
	70	231		70	250		70	282
	80	232		80	255		80	284
	90	235		90	256		90	280
	100	234		100	254		100	281
	110	232		110	252		110	282
	120	230		120	251		120	280

ตาราง ก - 3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับซึ่งข้าวโพด

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	31		0	28		0	28
	10	95		10	90		10	122
	20	162		20	180		20	192
	30	220		30	250		30	275
	40	238		40	251		40	274
	50	240		50	254		50	282
	60	230		60	250		60	283
	60	230		60	250		60	283
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.5 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	27		0	29		0	25
	10	77		10	95		10	107
	20	150		20	172		20	201
	30	228		30	226		30	276
	40	231		40	255		40	280
	50	231		50	254		50	282
	60	234		60	249		60	281
	70	233		70	248		70	276
	80	232		80	250		80	278
90	230	90	254	90	281			

ตาราง ก - 3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับซึ่งข้าวโพด (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	31		0	28		0	25
	10	87		10	102		10	106
	20	162		20	182		20	190
	30	231		30	248		30	268
	40	234		40	255		40	280
	50	235		50	253		50	284
	60	231		60	253		60	286
	70	228		70	252		70	280
	80	232		80	250		80	280
	90	234		90	255		90	280
	100	231		100	254		100	278
	110	233		110	250		110	287
	120	232		120	253		120	285

ตาราง ก - 4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับทางปาล์มน้ำมัน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	31		0	28		0	28
	10	95		10	76		10	122
	20	162		20	160		20	192
	30	220		30	250		30	275
	40	235		40	251		40	274
	50	234		50	258		50	282
	60	230		60	250		60	283
	60	230		60	250		60	283
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.5 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	27		0	29		0	25
	10	75		10	73		10	107
	20	150		20	162		20	201
	30	228		30	250		30	276
	40	231		40	253		40	280
	50	231		50	255		50	282
	60	234		60	249		60	281
	70	233		70	248		70	276
	80	232		80	250		80	278
90	230	90	254	90	281			

ตาราง ก - 4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับทางปาล์มน้ำมัน (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 2.0 ชั่วโมง								
	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ		เวลา (นาที)	อุณหภูมิ		เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	0		31	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส		0	38
	10	77		10	102		10	97
	20	162		20	182		20	190
	30	231		30	248		30	278
	40	233		40	256		40	280
	50	235		50	253		50	284
	60	234		60	253		60	282
	70	230		70	252		70	280
	80	232		80	250		80	280
	90	234		90	255		90	280
	100	231		100	252		100	278
	110	233		110	250		110	285
	120	232		120	253		120	284

ตาราง ก - 5. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับฟางข้าว

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	31		0	31		0	31
	10	80		10	98		10	130
	20	188		20	170		20	203
	30	226		30	248		30	280
	40	238		40	252		40	284
	50	230		50	251		50	282
	60	230		60	250		60	280
	60	230		60	250		60	280
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชัน 1.5 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	0	27		0	28		0	25
	10	98		10	100		10	125
	20	180		20	196		20	204
	30	230		30	247		30	280
	40	235		40	252		40	278
	50	233		50	254		50	285
	60	230		60	253		60	283
	70	229		70	250		70	282
	80	235		80	251		80	281
90	230	90	252	90	280			

ตาราง ก - 5. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับฟางข้าว (ต่อ)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	31		0	31		0	25
	10	92		10	105		10	123
	20	178		20	186		20	202
	30	231		30	249		30	281
	40	234		40	254		40	283
	50	233		50	255		50	280
	60	230		60	254		60	284
	70	230		70	254		70	282
	80	233		80	253		80	284
	90	234		90	251		90	280
	100	232		100	251		100	281
	110	228		110	253		110	282
	120	230		120	250		120	280

ตาราง ข. ผลได้เชิงมวล

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	มวลแห้งเริ่มต้น	มวลสุดท้าย	ผลได้เชิงมวล
เหง้ามัน สำปะหลัง	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	5.324	5.040	0.947
		1.5 ชั่วโมง	5.456	4.650	0.852
		2.0 ชั่วโมง	5.095	3.900	0.765
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	4.840	4.450	0.919
		1.5 ชั่วโมง	4.840	3.900	0.806
		2.0 ชั่วโมง	4.840	3.350	0.692
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	5.456	4.200	0.770
		1.5 ชั่วโมง	5.280	3.800	0.720
		2.0 ชั่วโมง	5.456	3.700	0.678
ใบและยอดอ้อย	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	3.142	2.850	0.907
		1.5 ชั่วโมง	3.142	2.460	0.783
		2.0 ชั่วโมง	3.142	2.260	0.719
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	3.520	3.120	0.886
		1.5 ชั่วโมง	3.520	2.630	0.747
		2.0 ชั่วโมง	3.520	2.400	0.682
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	3.520	3.000	0.852
		1.5 ชั่วโมง	3.520	2.500	0.710
		2.0 ชั่วโมง	3.520	2.150	0.611
ซังข้าวโพด	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	3.925	3.240	0.826
		1.5 ชั่วโมง	3.563	2.500	0.702
		2.0 ชั่วโมง	4.026	2.480	0.616
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	3.874	2.560	0.661
		1.5 ชั่วโมง	3.453	2.030	0.588
		2.0 ชั่วโมง	3.563	1.850	0.519
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	3.537	1.780	0.503
		1.5 ชั่วโมง	3.621	1.650	0.456
		2.0 ชั่วโมง	3.579	1.530	0.427

ตาราง ข. ผลได้เชิงมวล (ต่อ)

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	มวลแห้งเริ่มต้น	มวลสุดท้าย	ผลได้เชิงมวล
ทางปาล์มน้ำมัน	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	4.532	3.750	0.827
		1.5 ชั่วโมง	4.460	3.400	0.762
		2.0 ชั่วโมง	4.482	3.150	0.703
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	4.038	3.200	0.793
		1.5 ชั่วโมง	4.219	2.950	0.699
		2.0 ชั่วโมง	4.038	2.450	0.607
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	4.025	3.120	0.775
		1.5 ชั่วโมง	4.508	3.000	0.665
		2.0 ชั่วโมง	4.025	2.350	0.584
ฟางข้าว	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.804	1.360	0.754
		1.5 ชั่วโมง	2.055	1.350	0.657
		2.0 ชั่วโมง	1.840	1.130	0.614
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.965	1.430	0.728
		1.5 ชั่วโมง	2.473	1.550	0.627
		2.0 ชั่วโมง	2.305	1.310	0.568
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	2.144	1.400	0.653
		1.5 ชั่วโมง	2.144	1.150	0.536
		2.0 ชั่วโมง	2.200	1.100	0.500

ตาราง ค. ค่าความร้อน

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	ค่าความร้อน
ซังข้าวโพด	ซังข้าวโพดดิบ		14.970
	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	17.280
		1.5 ชั่วโมง	20.390
		2.0 ชั่วโมง	22.090
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	19.080
		1.5 ชั่วโมง	25.329
		2.0 ชั่วโมง	26.460
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	23.579
		1.5 ชั่วโมง	27.142
		2.0 ชั่วโมง	28.830
ใบและยอดอ้อย	ใบและยอดอ้อยดิบ		16.305
	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	18.620
		1.5 ชั่วโมง	19.940
		2.0 ชั่วโมง	22.620
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	19.445
		1.5 ชั่วโมง	20.820
		2.0 ชั่วโมง	23.250
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	21.001
		1.5 ชั่วโมง	22.22
		2.0 ชั่วโมง	23.930
ทางปาล์มน้ำมัน	ทางปาล์มน้ำมันดิบ		15.960
	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	17.732
		1.5 ชั่วโมง	20.508
		2.0 ชั่วโมง	21.279
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	19.908
		1.5 ชั่วโมง	22.403
		2.0 ชั่วโมง	23.612
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	22.378
		1.5 ชั่วโมง	25.566
		2.0 ชั่วโมง	27.015

ตาราง ค. ค่าความร้อน (ต่อ)

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	ค่าความร้อน	
เห้งน้ำมันสำปะหลัง	เห้งน้ำมันสำปะหลังดิบ		17.349	
	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	17.797	
		1.5 ชั่วโมง	20.088	
		2.0 ชั่วโมง	22.340	
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	18.262	
		1.5 ชั่วโมง	21.331	
		2.0 ชั่วโมง	23.428	
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	19.090	
		1.5 ชั่วโมง	23.602	
		2.0 ชั่วโมง	26.032	
	ฟางข้าว	ฟางข้าวดิบ		15.728
		230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	17.700
1.5 ชั่วโมง			18.941	
2.0 ชั่วโมง			19.519	
250 องศาเซลเซียส		1.0 ชั่วโมง	18.982	
		1.5 ชั่วโมง	21.001	
		2.0 ชั่วโมง	22.560	
280 องศาเซลเซียส		1.0 ชั่วโมง	20.371	
		1.5 ชั่วโมง	22.939	
		2.0 ชั่วโมง	24.075	

ตาราง ง. ประสิทธิภาพทอรีแพคชั้น กรณีพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแพคชั้น

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรี ไฟร์	เวลาในการทอรี ไฟร์	ประสิทธิภาพทอรี แพคชั้น
เหง้ามันสำปะหลัง	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.916
		1.5 ชั่วโมง	1.006
		2.0 ชั่วโมง	1.089
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.917
		1.5 ชั่วโมง	1.051
		2.0 ชั่วโมง	1.134
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.952
		1.5 ชั่วโมง	1.144
		2.0 ชั่วโมง	1.231
ใบและยอดอ้อย	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.948
		1.5 ชั่วโมง	0.995
		2.0 ชั่วโมง	1.078
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.003
		1.5 ชั่วโมง	1.043
		2.0 ชั่วโมง	1.125
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.060
		1.5 ชั่วโมง	1.086
		2.0 ชั่วโมง	1.108
ซังข้าวโพด	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.002
		1.5 ชั่วโมง	1.087
		2.0 ชั่วโมง	1.177
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.077
		1.5 ชั่วโมง	1.328
		2.0 ชั่วโมง	1.353
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.271
		1.5 ชั่วโมง	1.413
		2.0 ชั่วโมง	1.451

ตาราง ง. ประสิทธิภาพทอรีแพคชั้น กรณีพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแพคชั้น (ต่อ)

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	ประสิทธิภาพทอรีแพคชั้น
ทางปาล์มน้ำมัน	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.982
		1.5 ชั่วโมง	1.091
		2.0 ชั่วโมง	1.085
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.069
		1.5 ชั่วโมง	1.168
		2.0 ชั่วโมง	1.163
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.173
		1.5 ชั่วโมง	1.328
		2.0 ชั่วโมง	1.300
ฟางข้าว	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.855
		1.5 ชั่วโมง	0.905
		2.0 ชั่วโมง	0.840
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.863
		1.5 ชั่วโมง	1.029
		2.0 ชั่วโมง	1.023
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.935
		1.5 ชั่วโมง	1.045
		2.0 ชั่วโมง	1.036

ตาราง จ. ประสิทธิภาพทอริแฟคชั่น กรณีพลังงานที่ใช้ในเดินเตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่น

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอริไฟร์	เวลาในการทอริไฟร์	ประสิทธิภาพทอริแฟคชั่น
เห้งน้ำมันสำปะหลัง	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.899
		1.5 ชั่วโมง	0.976
		2.0 ชั่วโมง	1.045
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.896
		1.5 ชั่วโมง	1.013
		2.0 ชั่วโมง	1.068
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.928
		1.5 ชั่วโมง	1.144
		2.0 ชั่วโมง	1.167
ใบและยอดอ้อย	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.919
		1.5 ชั่วโมง	0.950
		2.0 ชั่วโมง	1.013
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.972
		1.5 ชั่วโมง	0.994
		2.0 ชั่วโมง	1.054
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.003
		1.5 ชั่วโมง	1.02
		2.0 ชั่วโมง	1.017
ซังข้าวโพด	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.975
		1.5 ชั่วโมง	1.033
		2.0 ชั่วโมง	1.114
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.042
		1.5 ชั่วโมง	1.256
		2.0 ชั่วโมง	1.264
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.215
		1.5 ชั่วโมง	1.332
		2.0 ชั่วโมง	1.350

ตาราง จ. ประสิทธิภาพทอริแฟคชั่น กรณีพลังงานที่ใช้ในเดินเตาปฏิกรณ์ทอริแฟคชั่น (ต่อ)

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอริไฟร์	เวลาในการทอริไฟร์	ประสิทธิภาพทอริแฟคชั่น
ทางปาล์มน้ำมัน	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.959
		1.5 ชั่วโมง	1.058
		2.0 ชั่วโมง	1.028
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.037
		1.5 ชั่วโมง	1.117
		2.0 ชั่วโมง	1.092
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	1.132
		1.5 ชั่วโมง	1.268
		2.0 ชั่วโมง	1.212
ฟางข้าว	230 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.816
		1.5 ชั่วโมง	0.846
		2.0 ชั่วโมง	0.761
	250 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.818
		1.5 ชั่วโมง	0.963
		2.0 ชั่วโมง	0.931
	280 องศาเซลเซียส	1.0 ชั่วโมง	0.884
		1.5 ชั่วโมง	0.958
		2.0 ชั่วโมง	0.927

กรณีศึกษาที่ 2 การใช้ชีวมวลอัดแท่งตะเกียบเป็นเชื้อเพลิง

ตาราง ฉ. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น

ตาราง ฉ - 1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับแห้งมันสำปะหลัง

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2.0 ชั่วโมง								
	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ		เวลา (นาท)	อุณหภูมิ		เวลา (นาท)	อุณหภูมิ
	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	0		31	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส		0	30
	10	51		10	65		10	86
	20	125		20	164		20	176
	30	230		30	250		30	277
	40	238		40	252		40	280
	50	235		50	254		50	285
	60	230		60	256		60	288
	70	238		70	259		70	280
	80	227		80	250		80	284
	90	236		90	258		90	289
	100	233		100	248		100	287
	110	235		110	252		110	285
	120	239		120	255		120	283

ตาราง ฉ - 2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับใบและยอดอ้อย

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	29		0	28		0	29
	10	67		10	85		10	113
	20	140		20	181		20	179
	30	228		30	248		30	280
	40	235		40	252		40	282
	50	239		50	254		50	285
	60	230		60	250		60	280
	70	233		70	259		70	276
	80	238		80	252		80	289
	90	229		90	249		90	282
	100	234		100	255		100	276
	110	235		110	250		110	285
	120	230		120	255		120	280

ตาราง ฉ - 3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับซึ่งข้าวโพด

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	29		0	28		0	30
	10	67		10	81		10	92
	20	162		20	182		20	179
	30	230		30	249		30	278
	40	231		40	251		40	280
	50	237		50	249		50	283
	60	233		60	257		60	287
	70	239		70	252		70	283
	80	228		80	248		80	281
	90	235		90	254		90	278
	100	230		100	251		100	284
	110	234		110	250		110	288
	120	237		120	254		120	280

ตาราง ฉ - 4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับทางปาล์มน้ำมัน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	28		0	28		0	29
	10	54		10	82		10	95
	20	130		20	172		20	188
	30	230		30	250		30	280
	40	233		40	253		40	283
	50	228		50	252		50	284
	60	235		60	249		60	287
	70	238		70	257		70	280
	80	227		80	252		80	283
	90	239		90	249		90	280
	100	228		100	259		100	284
	110	238		110	253		110	286
	120	235		120	249		120	279

ตาราง ฉ - 5. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์สำหรับฟางข้าว

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาในการทอรีแฟคชั่น 2.0 ชั่วโมง								
อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 230 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ	อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ
	0	29		0	31		0	29
	10	67		10	105		10	113
	20	155		20	169		20	180
	30	230		30	249		30	278
	40	226		40	257		40	286
	50	233		50	250		50	280
	60	236		60	252		60	284
	70	238		70	259		70	280
	80	232		80	257		80	281
	90	235		90	252		90	289
	100	237		100	254		100	288
	110	230		110	255		110	283
	120	230		120	257		120	280

ตาราง ข. ผลได้เชิงมวล

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	มวลแห้งเริ่มต้น	มวลสุดท้าย	ผลได้เชิงมวล
เห้งน้ำมัน สำปะหลัง	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	4.840	3.560	0.736
	250 องศาเซลเซียส		4.840	3.260	0.674
	280 องศาเซลเซียส		4.840	3.100	0.640
ใบและยอด อ้อย	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	2.816	2.000	0.710
	250 องศาเซลเซียส		2.948	2.000	0.678
	280 องศาเซลเซียส		2.640	1.590	0.602
ซังข้าวโพด	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	3.621	2.190	0.605
	250 องศาเซลเซียส		3.790	1.960	0.517
	280 องศาเซลเซียส		3.621	1.580	0.436
ทางปาล์ม น้ำมัน	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	4.120	2.920	0.709
	250 องศาเซลเซียส		4.532	2.790	0.616
	280 องศาเซลเซียส		3.708	2.180	0.588
ฟางข้าว	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	2.233	1.360	0.609
	250 องศาเซลเซียส		2.233	1.250	0.560
	280 องศาเซลเซียส		2.233	1.120	0.502

ตาราง ข. ค่าความร้อน

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	ค่าความร้อน
ซังข้าวโพด	ซังข้าวโพดดิบ		14.970
	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	21.960
	250 องศาเซลเซียส		26.576
	280 องศาเซลเซียส		28.763
ใบและยอดอ้อย	ใบและยอดอ้อยดิบ		16.305
	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	22.227
	250 องศาเซลเซียส		23.232
	280 องศาเซลเซียส		24.230
ทางปาล์มน้ำมัน	ทางปาล์มน้ำมันดิบ		15.960
	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	20.892
	250 องศาเซลเซียส		23.276
	280 องศาเซลเซียส		26.896
เหง้ำมันสำปะหลัง	เหง้ำมันสำปะหลังดิบ		17.349
	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	22.550
	250 องศาเซลเซียส		24.130
	280 องศาเซลเซียส		17.005
ฟางข้าว	ฟางข้าวดิบ		15.728
	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	19.060
	250 องศาเซลเซียส		22.380
	280 องศาเซลเซียส		23.950

ตาราง ณ. ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น กรณีพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทอรีแฟคชั่น

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรีไฟร์	เวลาในการทอรีไฟร์	ประสิทธิภาพทอรีแฟคชั่น
เห้งน้ำมันสำปะหลัง	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	1.100
	250 องศาเซลเซียส		1.175
	280 องศาเซลเซียส		1.314
ใบและยอดอ้อย	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	1.030
	250 องศาเซลเซียส		1.084
	280 องศาเซลเซียส		1.099
ซังข้าวโพด	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	1.141
	250 องศาเซลเซียส		1.398
	280 องศาเซลเซียส		1.488
ทางปาล์มน้ำมัน	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	1.073
	250 องศาเซลเซียส		1.205
	280 องศาเซลเซียส		1.342
ฟางข้าว	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	0.852
	250 องศาเซลเซียส		0.989
	280 องศาเซลเซียส		1.059

ตาราง ญ. ประสิทธิภาพทอรีแพคชั้น กรณีพลังงานที่ใช้ในเดินเตาปฏิกรณ์ทอรีแพคชั้น

ชีวมวล	อุณหภูมิในการทอรี ไฟร์	เวลาในการทอรี ไฟร์	ประสิทธิภาพทอรี แพคชั้น
เห้งน้ำมันสำปะหลัง	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	1.054
	250 องศาเซลเซียส		1.118
	280 องศาเซลเซียส		1.237
ใบและยอดอ้อย	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	0.963
	250 องศาเซลเซียส		1.005
	280 องศาเซลเซียส		0.995
ซังข้าวโพด	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	1.074
	250 องศาเซลเซียส		1.308
	280 องศาเซลเซียส		1.376
ทางปาล์มน้ำมัน	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	1.017
	250 องศาเซลเซียส		1.142
	280 องศาเซลเซียส		1.244
ฟางข้าว	230 องศาเซลเซียส	2.0 ชั่วโมง	0.785
	250 องศาเซลเซียส		0.898
	280 องศาเซลเซียส		0.941

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล ที่อยู่	นายวรสันต์ จันทร์เสถียร 130/1 ม.3 ต.สามตำบล อำเภอจุฬาภรณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80130
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2543	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนมัธยมศึกษาจุฬาภรณ์ (เดิม: สามตำบลวิทยาประชาสรรค์) อำเภอจุฬาภรณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
พ.ศ. 2547	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาภาคใต้ อำเภอพระพรหม จังหวัดนครศรีธรรมราช
พ.ศ. 2550	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2554	ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม