การสร้างแบบจำลองทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

โดย
นางสาวศรีอุมา เพชรกล้า

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

การสร้างแบบจำลองทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

โดย
นางสาวศรีอุมา เพชรกล้า

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

THERMAL MODELLING OF THERMOSYPHON TORREFACTION REACTOR

By

MISS Sriuma PHECHGLAR

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Engineering (ENERGY ENGINEERING)

Department of MECHANICAL ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2017

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การสร้างแบบจำลองทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน
โดย	ศรีอุมา เพชรกล้า
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ณัฐ ธัชยะพงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(อาจารย์ ดร. สุระ ตันดี)

56406204 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : ชีวมวล, เทอร์โมไซฟอน, ทอรีแฟคชั่น, เตาปฏิกรณ์, แบบจำลองคณิตศาสตร์

นางสาว ศรีอุมา เพชรกล้า: การสร้างแบบจำลองทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบด้วยท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนผ่านหลักการทำงานของการส่งผ่านความร้อนของสารทำงานในระบบสุญญากาศสำหรับใช้ในการส่งผ่านความร้อนจากท่อเทอร์โมไซฟอนไปยังเตาปฏิกรณ์ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในช่วงระยะให้ความร้อนจนถึงระยะทำระเหย ที่อุณหภูมิเป้าหมายของชีวมวลมีค่า 493.15 K เนื่องจากไม่มีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีในช่วงอุณหภูมินี้ โดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์จะอาศัยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่พิจารณาในปริมาตรควบคุมแบบ Uniform – State, Uniform - Flow Process (USUF) ใช้วิธีการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบรุงเง – คุตต้าอันดับ ที่สี่ (Runge - Kutta 4th order method for ordinary differential equations) และทำการคำนวณด้วยโปรแกรม Matlab 2014 พร้อมทั้งทำนายลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน ได้แก่ อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล สำหรับแหล่งให้ความร้อนคือก๊าซหุงต้ม (LPG) ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า การทำนายอัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน Absolute average error และ Absolute bias error เท่ากับ ±8.98 %และ 1.38 % ตามลำดับ อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของความต้านทานความร้อนเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่าน้อยๆ (0.5 ถึง 3.0 K/W) และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างช้าๆเป็นเชิงเส้นเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่ามาก (3.5 ถึง 10.0 K/W) อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกในชีวมวลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้นในระยะอุ่นร้อนและในระยะทำระเหย เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่าน้อยๆ (5 - 10 wt%) อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่ามากๆ (10 - 30 wt%) อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างช้าๆ

56406204 : Major (ENERGY ENGINEERING)
Keyword : biomass, thermosyphon, torrefaction, reactor, mathematical modelling

MISS SRIUMA PHECHGLAR : THERMAL MODELLING OF THERMOSYPHON TORREFACTION REACTOR THESIS ADVISOR : NITIPONG SOPONPONGPIPAT

Thermosyphon torrefaction reactor was created to torrefied rice straw and corncob under non – oxidative torrefaction. A mathematical modelling was established to describe the behavior of a thermosyphon torrefaction reactor over heating and drying period. The target temperature of 493.15 K, due to the effect of decomposition chemical was not happened. To study temperature distribution within thermosyphon torrefaction reactor via the model is based on the first law of thermodynamic for control volume. The uniform state, uniform flow process is useful in the analysis of processes. The equations can be solved by using the runge – kutta 4^{th} order method for ordinary differential equations and simulated by Matlab 2014. The model is compared to experimental data obtained from a thermosyphon torrefaction reactor. The heat transfer characteristics of heating rate of thermosyphon torrefaction reactor was predicted. The results indicate that the heating rate rapidly decreases with increasing the heat resistance. The increase the hot air in combustor results in increase the heating rate and the moisture content increase with decreasing the heating rate.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือที่ได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ณัฐ ธัชยะพงษ์ อาจารย์ ดร.วีระนุช อินทะกันท์ อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธาราวดี และ อาจารย์ ดร.สุระ ตันดี ที่กรุณาให้ข้อแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านในการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความช่วยเหลือเกี่ยวกับงานวิจัยในส่วนด้านการปรับปรุงเครื่องมือ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความช่วยเหลือเกี่ยวกับงานวิจัยในส่วนด้านการวิเคราะห์วัสดุชีวมวล และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความช่วยเหลือเกี่ยวกับงานวิจัยในส่วนสถานที่การทดลอง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกภาควิชาเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณแม่ ญาติพี่น้องทุกคนในตระกูลเพชรกล้าและตระกูลส่องสุขที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณลุงตั้น คุณลุงหมาย พี่ก้อง พี่ป๊อป พี่ๆห้องภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลชั้น 4 และห้องบริหารการศึกษาชั้น1 เพื่อน พี่ น้อง ทั้งศิษย์เก่าและปัจจุบันในห้องวิจัยนวัตกรรมและเชื้อเพลิง (LIFE LAB) ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่คอยเป็นกำลังใจและอยู่ด้วยกันตลอดเวลา และขอขอบคุณพี่ Aya P. ที่เป็นแรงบันดาลใจและกำลังใจ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างสูง

คุณค่าและประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอน้อมอุทิศแด่ คุณพ่อสมบูรณ์ เพชรกล้า แต่เพียงผู้เดียว

ศรีอุมา เพชรกล้า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 5

1.3 สมมติฐานของการวิจัย 5

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 5

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย 6

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย 6

1.7 ความจำกัดของการวิจัย 7

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ 7

บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 ชีวมวล 8

2.2 สารประกอบทั่วไปของชีวมวล 8

2.3 ทฤษฎีท่อเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) 9

2.4 รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

2.4.1 กระบวนการทอรีแฟคชัน 12

2.4.2 หลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟคชัน 12

2.4.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น 15

2.4.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์ 23
2.4.5 ทฤษฎีการทำระเหย 24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 27
3.1 แผนการวิจัย 27
3.2 แผนการทดลอง 28
3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ 30
3.3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน 30
3.3.1.1 ช่วงที่ 1 ระยะให้ความร้อน (Heating period) 32
3.3.1.2 ช่วงที่ 2 ระยะทำระเหย (Dehydration period) 37
3.3.1.3 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab 2014 47
3.4 วิธีการทดลอง 51
3.5 วัตถุดิบและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย 53
3.6 ระยะเวลาการวิจัย 59
3.7 สถานที่ทำการวิจัย 60
3.8 งบประมาณการวิจัย 61
บทที่ 4 ผลการวิจัย 62
4.1 ลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนและการประเมินความคลาดเคลื่อนของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น 62
4.2 ผลของความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล 68
4.3 ผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล 76
4.4 ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น 82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 87

5.1 ลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนและการประเมินความคลาดเคลื่อนของอัตราการให้ความร้อนโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น 87

5.2 ผลของความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล 88

5.3 ผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล 88

5.4 ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น 88

5.5 ข้อเสนอแนะ 89

รายการอ้างอิง 90

ภาคผนวก ก 94

ภาคผนวก ข 103

ภาคผนวก ค 193

ค.1 โปรแกรม Matlab 2014 เบื้องต้น 194

ค. 2 วิธีการใช้งานโปรแกรม Matlab 195

ค.3 วิธีการเขียนและประมวลผลของโปรแกรม Matlab 201

ประวัติผู้เขียน 210

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันทั่วโลกมีแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลลดลงเนื่องจากมีปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซไอเสียสู่ชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน ทำให้หลายๆประเทศทั่วโลกให้ความสนใจและพยายามอย่างยิ่งที่จะหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานและมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานชีวมวลหรือพลังงานชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีความสำคัญในโลกมาก ได้แก่ ซังข้าวโพด กะลามะพร้าว กาบมะพร้าว ฟางข้าว ชานอ้อย ไม้ยางพารา ของเหลือใช้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เป็นต้น ชีวมวลสามารถถูกใช้งานร่วมกันกับถ่านหินในกระบวนการเผาไหม้ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นและการไพโรไลซิส แต่อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของชีวมวลดิบมีความแตกต่างจากคุณสมบัติของถ่านหินอย่างเห็นได้ชัด สำหรับชีวมวลดิบมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และสารระเหยโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 0.5 – 20 wt% และ 0.9 – 20 wt% ตามลำดับและปริมาณของธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) อยู่ในช่วง 39 – 50 wt% และจาก 37 – 50 wt% ตามลำดับ และสำหรับถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและสารระเหยอยู่ในช่วง 46 – 92 wt% และ 0.9 – 50 wt% ตามลำดับและปริมาณของธาตุคาร์บอนและออกซิเจนอยู่ในช่วง 64 – 92 wt% และ 1 – 25 wt% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ชีวมวลดิบมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนที่ต่ำกว่าถ่านหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความร้อนของชีวมวลดิบ ซึ่งค่าความร้อนของชีวมวลดิบและถ่านหินมีค่าอยู่ในช่วง 15 – 20 MJ/kg และ 25 – 35 MJ/kg ตามลำดับ ดังนั้น พลังงานชีวมวลจึงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจที่สุดสำหรับการจัดหาแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเชิงอุตสาหกรรม [1]

ชีวมวลสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเหล่านี้ให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ดีได้ด้วยกระบวนการการสลายตัวเชิงความร้อน ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามอุณหภูมิของการสลายตัวคือ กระบวนการคาร์บอไนเซชันและกระบวนการทอรีแฟคชั่น สำหรับกระบวนการคาร์บอไนเซชันจะดำเนินการที่อุณหภูมิมากกว่า 573.15 K ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้คือถ่านหรือชาร์ [2] และสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะ

ดำเนินการที่อุณหภูมิในช่วง 473.15 – 573.15 K ภายใต้สภาวะบรรยากาศ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองสภาวะบรรยากาศคือแบบภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน (Non - oxidative torrefaction characterization) และแบบภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน (Oxidative torrefaction characterization) สำหรับหลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟคชั่นนี้ แบ่งออกเป็น 4 ช่วงระยะเวลาด้วยกันคือ ระยะอุ่นร้อน ระยะทำระเหย ระยะทอรีแฟคชั่นและระยะการทำเย็น สำหรับระยะอุ่นร้อนอุณหภูมิจะเริ่มดำเนินการตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิก่อนน้ำระเหยออกจากชีวมวลซึ่งอยู่ในช่วง 307.15 – 373.15 K ในระยะนี้ชีวมวลจะไม่มีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีและการสูญเสียน้ำหนัก สำหรับระยะทำระเหยอุณหภูมิจะเริ่มตั้งแต่เมื่อความร้อนทำให้มวลน้ำเริ่มระเหยออกจากชีวมวลจนถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นคืออยู่ในช่วงอุณหภูมิ 373.15 – 473.15 K ในระยะนี้ชีวมวลจะไม่มีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีแต่เกิดกระบวนการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยของมวลน้ำที่อยู่ในชีวมวล สำหรับระยะทอรีแฟคชั่นอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 473.15 – 573.15 K ชีวมวลจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีและสูญเสียน้ำหนัก ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน และสุดท้ายช่วงของระยะการทำเย็นคือทำให้อุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง งานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้มีการดำเนินการทอรีแฟคชั่นชีวมวลผ่านเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดนิ่งในระดับห้องปฏิบัติการ ได้แก่ Rousset และคณะ [2] ได้ดำเนินการทอรีแฟคชั่นไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 513.15 และ 553.15 K เวลา 2 ชั่วโมง Ratte และคณะ [3] ได้ดำเนินการทอรีแฟคชั่นไม้ที่มีรูปร่างกลมในช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสอย่างช้า Medic และคณะ [4] ได้ดำเนินการทอรีแฟคชั่นฟางข้าวบาร์เลย์ ที่อุณหภูมิ 503.15 – 573.15 K ต่อมาได้มีการดำเนินการทอรีแฟคชั่นชีวมวลผ่านเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับห้องปฏิบัติการ ได้แก่ Wang และคณะ [5] ได้ดำเนินการทอรีไฟร์รำข้าวและชานอ้อย โดยมีกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟตั้งแต่ 150 – 400 W ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 523.15 K ระยะเวลา 15 นาที Huang และคณะ [6] ทอรีไฟร์ฟางข้าวและพืชน้ำผ่านกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟตั้งแต่ 150 – 350 W ที่อุณหภูมิห้องจนถึง 673.15 K และ Repellin และคณะ [7] ได้ดำเนินการทอรีไฟร์ไม้บีชและไม้สนผ่านเตาปฏิกรณ์ทรีแฟคชั่นแบบโรตารี่คลินในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ด้วยอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นตั้งแต่ 453.15 – 533.15 K ระยะเวลา 5 – 60 นาที พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จะมี 3 ระยะคือ ระยะอุ่นร้อน ระยะทำระเหยและระยะทอรีแฟคชั่น ส่วนรายงานของ Basu และคณะ [8] ได้รายงานว่ากระบวนการทอรีแฟคชั่นมีขั้นตอนการให้ความร้อน 4 ระยะ คือ ระยะอุ่นร้อน ระยะทำระเหย ระยะหลังทำระเหยและระยะ

ทอรีแฟคชั่น นอกจากนี้ในหลายๆงานวิจัยได้ทำการศึกษาการทอรีแฟคชั่นชีวมวลนี้ด้วยสภาวะภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน โดย Wang และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาทอรีแฟคชั่นขี้เลื่อยโดยใช้ปริมาณของก๊าซออกซิเจน 0, 3 และ 6 vol% เป็นก๊าซตัวพาและทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 523.15, 543.15 และ 563.15 K พบว่า คุณสมบัติของขี้เลื่อยทอรีไฟร์ใกล้เคียงกับแบบภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความร้อนและผลได้พลังงาน Rousset และคณะ [10] ศึกษาคุณสมบัติเชิงเคมีและเชิงกายภาพของยูคาลิปตัสทอรีไฟร์ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่มีความเข้มข้น 2, 6, 10 และ 21 vol% ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 513.15 และ 553.15 K ระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของออกซิเจน 21 vol% ส่งผลต่อผลได้ของของแข็งอย่างมีนัยสำคัญและสำหรับภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนส่วนใหญ่มักจะพบงานวิจัยที่ดำเนินการโดยใช้บรรยากาศเฉื่อยเป็นก๊าซตัวพาออกซิเจนและสารระเหยออกจากระบบในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยเฉพาะการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะส่งผลให้การปรับปรุงคุณสมบัติชีวมวลดีขึ้นคือค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจากชีวมวลดิบ 40 wt% และน้ำหนักสูญเสีย 50 wt% ปริมาณความชื้นและอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนต่ำลง ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เพิ่มค่าความหนาแน่นและลักษณะความไม่ชอบน้ำ[11]

สำหรับการพัฒนาเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นโดยทั่วไปได้มีการเริ่มพัฒนาเตาปฏิกรณ์ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ ระดับกึ่งอุตสาหกรรม ตลอดจนระดับเชิงพาณิชย์ รูปแบบเตาส่วนใหญ่จะมีการสร้างและหลักการทำงานที่แตกต่างกัน สำหรับในระดับห้องปฏิบัติการดำเนินการสร้างเพื่อต้องการหาตัวแปรที่เหมาะสมต่อกระบวนการทอรีแฟคชั่นจึงนำไปสู่การสร้างเตาปฏิกรณ์ที่ถูกพัฒนาแล้วในระดับกึ่งอุตสาหกรรมและระดับเชิงพาณิชย์ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดเป็นเตาปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนาไปสู่ระดับนำร่องอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย เตารูปแบบนี้มีระบบไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยหลักการทำงานคือชีวมวลถูกนำมาวางไว้ในเตาปฏิกรณ์และมีแหล่งให้ความร้อนโดยตรงอาจจะล้อมรอบหรือให้ความร้อนในส่วนล่าง Chen และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาผลของการทอรีแฟคชั่นไม้สนพื้นเมืองชนิดหนึ่ง (Lauan) กับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีแหล่งให้ความร้อนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าล้อมรอบ พบว่า ชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่นมีค่าความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลดิบเตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบดในระดับกึ่งอุตสาหกรรมมีพื้นฐานของการสร้างและหลักการทำงานมาจากระดับห้องปฏิบัติการ โดยแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าระบบได้จากการเผาไหม้ชีวมวลดิบโดยตรง ซึ่งโดยปกติแหล่งให้ความร้อนที่

ป้อนเข้าสู่ระบบในระดับห้องปฏิบัติการจะเป็นเครื่องให้ความร้อนไฟฟ้าและเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ไม่สามารถดำเนินการอย่างต่อเนื่องได้ ศูนย์วิจัยพลังงานของประเทศเนเธอร์แลนด์ได้ออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้พร้อมทำการทอรีแฟคชั่นไม้สนพื้นเมืองด้วยกำลังการผลิต 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [13] และเตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบดในระดับเชิงพาณิชย์จะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับเตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบดในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ในปีค.ศ.2010 บริษัทอินเทโกรฟลูเอล ได้ดำเนินการสร้างเตาปฏิกรณ์รูปแบบนี้ โดยมีกำลังการผลิตชีวมวลทอรีไฟร์ 48,000 ตันต่อปี พบว่าการกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์ [14] งานวิจัยนี้จึงได้เล็งเห็นว่า ควรมีการปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นให้มีการทำงานที่สามารถทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น ซึ่งจากความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการส่งผ่านความร้อนสำหรับท่อชนิดเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ที่เป็นเครื่องมือขนส่งทางความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ทำงานได้ดีในทิศทางตั้งฉากกับแนวระดับ ภายในบรรจุสารทำงานที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านความร้อนในสภาวะสุญญากาศ ตัวท่อผลิตด้วยวัสดุที่นำความร้อนได้ดี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำให้การกระจายความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนได้ แต่ท่อชนิดนี้จะสามารถทำงานได้ดีในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบเปิดและแบบปิดสองสถานะ เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two - phase closed thermosyphon) ซึ่งสามารถส่งผ่านความร้อนได้มากกว่าเทอร์โมไซฟอนแบบเปิด เนื่องจากท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะจะถ่ายเทความร้อนแฝง (Latent heat) ในขณะที่เทอร์โมไซฟอนแบบเปิดจะถ่ายเทความร้อนสัมผัส (Sensible heat) [15] ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้มีการพัฒนาท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนเพื่อรองรับแอปพลิเคชั่นต่างๆ มีการศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนของท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนพบว่าอุณหภูมิในส่วนควบแน่น (Condenser section) ต่ำกว่าอุณหภูมิในส่วนทำระเหย (Evaporator section) และความแตกต่างของอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างน้อยมากอย่างมีนัยสำคัญ การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งท่อ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนนี้มีประสิทธิภาพที่ดี[16]

ดังนั้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบด้วยท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนผ่านหลักการทำงานของการส่งผ่านความร้อนของสารทำงานในระบบสุญญากาศสำหรับใช้ในการส่งผ่านความร้อนจากท่อเทอร์โมไซฟอนไปยังเตาปฏิกรณ์ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิด

เทอร์โมไซฟอนในช่วงระยะให้ความร้อนจนถึงระยะทำระเหย ที่อุณหภูมิเป้าหมายของชีวมวลมีค่า 493.15 K เนื่องจากไม่มีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีในช่วงอุณหภูมินี้ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน โดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์จะอาศัยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่พิจารณาในปริมาตรควบคุมแบบ Uniform – State, Uniform - Flow Process (USUF) ใช้วิธีการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบรุงเง – คุตต้าอันดับที่สี่ (Runge - Kutta 4th order method for ordinary differential equations) และทำการคำนวณด้วยโปรแกรม Matlab 2014 พร้อมทั้งทำนายลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน ได้แก่ อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล สำหรับแหล่งให้ความร้อนคือก๊าซหุงต้ม (LPG)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในช่วงระยะเริ่มให้ความร้อนจนถึงระยะทำระเหย

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน ได้แก่ อัตราการทำความร้อนแกชีวมวล โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชั่นสามารถทำได้โดยการใช้ท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านความร้อน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาคือ ฟางข้าวและซังข้าวโพด

1.4.2 ชีวมวลทำการทอรีแฟคชั่นด้วยการควบคุมอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K

1.4.3 ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 493.15 K

1.4.4 ดำเนินการทำการทอรีแฟคชันชีวมวลโดยใช้เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนโดยใช้ท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนที่มีจำนวนทั้งหมด 5 ท่อ แต่ละท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร ท่อยาว 110 เซนติเมตร แบ่งเป็นส่วนควบแน่น 60 เซนติเมตร (ห้องปฏิกรณ์) และ

ส่วนทำระเหย 50 เซนติเมตร (ห้องให้ความร้อน) ภายในบรรจุสารทำงาน Dowtherm A ด้วยปริมาตร 50 % ของปริมาตรในส่วนทำระเหย

1.4.5 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนคือ ก๊าซหุงต้ม (LPG)

1.4.6 โปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณคือ โปรแกรม Matlab 2014

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเพื่อหาเงื่อนไขและหลักการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

1.5.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเพื่อหาเงื่อนไขสำหรับการสร้างแบบจำลองของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

1.5.3 สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนตั้งแต่ระยะให้ความร้อนจนถึงระยะทำระเหย

1.5.4 ดำเนินการทดลองตามเงื่อนไขข้างต้นกับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

1.5.5 เปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง

1.5.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

1.5.7 สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนพร้อมเขียนรายงานสรุปการวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.6.1 ดำเนินการทดลองด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน ในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) และทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

1.6.2 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดชนิดเทอร์โมไซฟอนที่สร้างขึ้นอาศัยหลักการไพโรไลซิสแบบภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน (Non - oxydative pyrolysis)

1.7 ความจำกัดของการวิจัย

สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 ชีวมวล (Biomass) คือ เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เหง้ามัน ทางปาล์ม ใบและยอดอ้อย ซังข้าวโพด และฟางข้าว เป็นต้น และของเสียจากกระบวนการผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน เช่น กากน้ำตาล แกลบ มูลสัตว์ เป็นต้น

1.8.2 ทอรีแฟคชั่น (Torrefaction) คือ การปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลที่ดำเนินการอุณหภูมิในช่วง 473.15 – 573.15 K ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อยและอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำ

1.8.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น (Torefaction reactor) คือ เตาปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น ภายในเตาปฏิกรณ์จะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 473.15 – 573.15 K

1.8.4 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด (Fixed bed torefaction reactor) คือ เตาปฏิกรณ์ที่มีตะกรับวางอยู่นิ่งและมีแหล่งให้ความร้อนล้อมรอบหรือส่วนล่างของเตา

1.8.5 สารระเหย (Volatile) คือ สารในกลุ่มของกรดที่ถูกปลดปล่อยเมื่อพันธะเคมีถูกทำให้สลายตัวด้วยความร้อน

1.8.6 ท่อชนิดเทอร์โมไซฟอน (Two - phase closed thermosyphon) คือ อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีการทำงานโดยอาศัยหลักการเดือดและอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นตัวช่วยในการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อ

1.8.7 ท่อความร้อน (Heat pipe) คือ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานภายในท่อและภายในมีวัสดุพรุนช่วยในการดูดซับสารทำงานนั้น

1.8.8 สารทำงาน (Working fluid) คือ สารที่อยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่งทำหน้าที่ในการเป็นตัวพาความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

บทที่ 2
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือทรัพยากรทางชีวภาพจำนวนมหาศาลที่จัดหาง่ายและมีปริมาณมากที่สามารถจัดเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ของเสียจากสัตว์ กากตะกอนจากน้ำเสีย รวมถึงของเสียจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ชีวมวลสามารถนำไปแปรรูปเป็นแหล่งพลังงานได้ ซึ่งปัจจุบันชีวมวลนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในเชิงอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากชีวมวลโดยส่วนใหญ่จะเป็นจำพวกพืช โดยพืชจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจะได้แป้งและน้ำตาลที่กักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช และในขณะเดียวกันยังสามารถผลิตก๊าซออกซิเจนไปยังบรรยากาศ ฉะนั้น เมื่อนำชีวมวลในรูปของเชื้อเพลิงมาเผาไหม้จะทำให้มีปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศมีค่าน้อยมากและสามารถที่จะเป็นแหล่งพลังงานได้[17]

2.2 สารประกอบทั่วไปของชีวมวล

สารประกอบหลักของชีวมวล ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง โปรตีน และสารอินทรีย์และอนินทรีย์ [18]

2.2.1 เซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ที่ดีกลูโคสถูกเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิกซึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_{nn}$ นั่นคือดีกรีของโพลิเมอร์ไรเซชั่นที่มีความกว้างตั้งแต่หลายพันจนถึงหลายหมื่นหน่วย จำนวนผลลัพธ์ของการไฮโรไลซิสเซลลูโลสคือ ดีกลูโคส (โมโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลลัพธ์เป็นไดแซคคาไรด์ (เซลลูไบโอส) และโพลีแซคคาไรด์ และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึกและต้านทานต่อกรดและด่าง

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีจำนวนยูนิตคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซคคาไรด์รวมถึงดีไซโลสและดีอะราไบโนส และคาร์บอนเท่ากับ 6 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส ดีกาแลคโตสและดีกลูโคส โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 5 ซึ่งมีจำนวนมากกว่า โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 6 ฉะนั้นสูตรโมเลกุลคือ $(C_5H_8O_4)_n$ เนื่องจากดีกรีโพลิเมอร์ไรเซชั่นของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50 - 200 โดยมี

ขนาดเล็กกว่าเซลลูโลสจึงสามารถสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจำนวนมาก สามารถละลายได้ในสารละลายเบส โดยเฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือไซแลน

2.2.3 ลิกนิน

สารประกอบที่เชื่อมกันด้วยยูนิตฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมากยากที่จะสลายโดยจุลินทรีย์และสารเคมี นอกจากนั้นยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันด้วยลิกนินถูกพบในสารชีวมวลชนิดต่างๆและแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก

2.2.4 แป้ง

โพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของดีกลูโคส แต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟากลูโคไซดิก เนื่องจากความต่างของโครงสร้างพันธะ เซลลูโลสละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้งจะละลายในน้ำร้อนและบางส่วนจะไม่ละลาย แป้งถูกพบในเมล็ด รากและลำต้น

2.2.5 โปรตีน

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของโพลิเมอร์ไรเซชั่น

2.2.6 สารอินทรีย์และอนินทรีย์

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์อื่นๆมีหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ ได้แก่ กลีเซอรอลและซูโครสในอ้อย

2.3 ทฤษฎีท่อเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) เป็นท่อความร้อนชนิดหนึ่งที่อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นตัวช่วยในการไหลเวียนของสารทำงานภายในท่อ ท่อเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพคล้ายกับท่อความร้อน (Heat pipe) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อประหยัดพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานซึ่งมีการนำมาใช้งานหลายประเภทด้วยกัน

2.3.1 โครงสร้างของท่อเทอร์โมไซฟอน

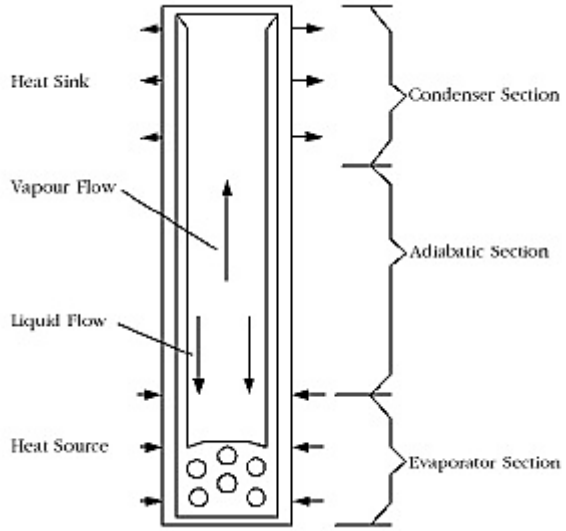
ส่วนประกอบของท่อกาลักความร้อน แบ่งได้ 3 ส่วนดังนี้

2.3.1.1 ส่วนทำระเหย (Evaporator section) คือส่วนที่สัมผัสกับแหล่งให้ความร้อนโดยที่ความร้อนจะทำให้สารทำงานภายในนั้นเกิดการระเหยเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ

2.3.1.2 ส่วนฉนวน (Adiabatic section) คือส่วนที่สารทำงานเกิดเคลื่อนที่ผ่านไปโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนใดๆเกิดขึ้น

2.3.1.3 ส่วนควบแน่น (Condenser section) คือส่วนที่สารทำงานเกิดการควบแน่นจากสถานะไอกลายเป็นสถานะของเหลว

ภายในท่อเทอร์โมไซฟอนจะมีสารทำงานบรรจุอยู่ ซึ่งสารนี้ทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น โดยส่วนของฉนวนทำหน้าที่เป็นช่องของการไหลให้ไอผ่านจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น โดยส่วนฉนวนนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้ความร้อนที่สารทำงานพามาด้วยรั่วไหลออกไปในระหว่างทางก่อนเข้าสู่ส่วนควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



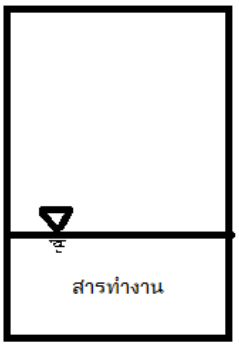
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของท่อเทอร์โมไซฟอน

2.3.2 หลักการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอน

การทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอนผ่านสารทำงานที่อยู่ภายในท่อเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิห้อง โดยเริ่มจากสภาวะที่ยังไม่เป็นท่อเทอร์โมไซฟอนดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากรูปสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อยังคงมีสถานะเป็นของเหลวอัดตัว เนื่องจากอิทธิพลของความดันบรรยากาศที่อยู่เหนือสารทำงานการส่งผ่านความร้อนจึงไม่เกิดขึ้น

เมื่อนำเทอร์โมไซฟอนไปวางไว้ในแหล่งรับความร้อนและแหล่งให้ความร้อนความแตกต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสองจะทำให้เกิดการไหลเวียนของสารทำงานในแหล่งให้ความ

ร้อนอุณหภูมิที่สูงขึ้นกว่าปกติจะทำให้สารทำงานในสถานะของเหลวที่อยู่ในส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอนการเดือดหรือระเหยกลายเป็นไอและมีความดันสูงขึ้นจะพาความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนออกไปในรูปของความร้อน ในขณะที่สารทำงานในสถานะไอที่อยู่ในส่วนควบแน่นซึ่งเย็นกว่าจะเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวและมีความดันลดลง



รูปที่ 2.2 แสดงท่อเทอร์โมไซฟอนก่อนวางในแหล่งความร้อน

เมื่อไอไหลเข้าสู่ส่วนควบแน่นอุณหภูมิและความดันจะลดลงและค่อยๆควบแน่นกลายเป็นของเหลว ความร้อนแฝงจากการควบแน่นของสารทำงานจะถูกส่งผ่านออกไปยังแหล่งความร้อน ของเหลวที่เกิดขึ้นจากการควบแน่นจะสะสมรวมกันกลายเป็นฟิล์มของเหลวจากส่วนที่ควบแน่นกลับลงสู่ส่วนทำระเหยที่อยู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อของเหลวไหลกลับเข้าสู่ส่วนทำระเหยจะเกิดการเป็นไอขึ้นอีกครั้งและไหลกลับขึ้นไปยังส่วนควบแน่นและควบแน่นกลับลงไปส่วนทำระเหยเป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆเนื่องจากการควบแน่นและระเหยที่เกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอนทำให้เกิดการส่งผ่านความร้อนได้มากแม้จะมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างแหล่งให้ความร้อนได้มาก

ดังนั้น การส่งผ่านความร้อนของเทอร์โมไซฟอนเกิดจากการระเหยกลายเป็นไอของสารทำงานที่อยู่ในส่วนทำระเหยและไหลไปยังส่วนควบแน่นซึ่งขณะกลายเป็นไอมันจะพาความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปในรูปของความร้อนแฝงและเมื่อไอไหลเข้าสู่ส่วนควบแน่นมันจะคายความร้อนแฝงให้กับแหล่งรับความร้อนแล้วควบแน่นกลายเป็นของเหลวและไหลกลับส่วนทำความร้อนอีกครั้ง

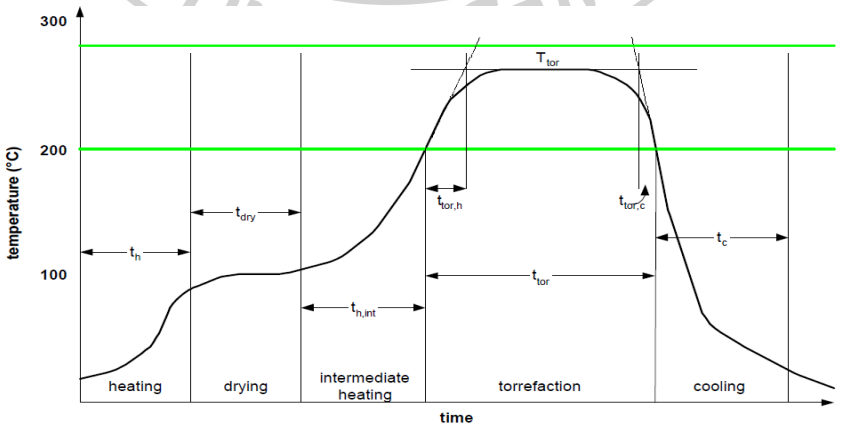
2.4 รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 กระบวนการทอรีแฟคชัน

กระบวนการทอรีแฟคชันคือ กระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลโดยวิธีใช้ความร้อนเชิงเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อนจะดำเนินการที่ช่วงอุณหภูมิ 473.15 – 573.15 K ภายใต้สภาวะบรรยากาศ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองสภาวะบรรยากาศคือแบบภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน (Oxidative torrefaction characterization) และแบบภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน (Non - oxidative torrefaction characterization) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและมีอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำ โดยกระบวนการปรับปรุงชีวมวลด้วยความร้อนทางเคมี ทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบในชีวมวล ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 498.15 – 508.15 K เซลลูโลสจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 578.15 – 648.15 K และลิกนินจะค่อยๆสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 523.15 – 773.15 K ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงขึ้น ความชื้นต่ำ ความหนาแน่นรวมสูง ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูง ความสามารถในการบดดีและมีความไม่ชอบน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลที่เป็นวัสดุดิบ[19]

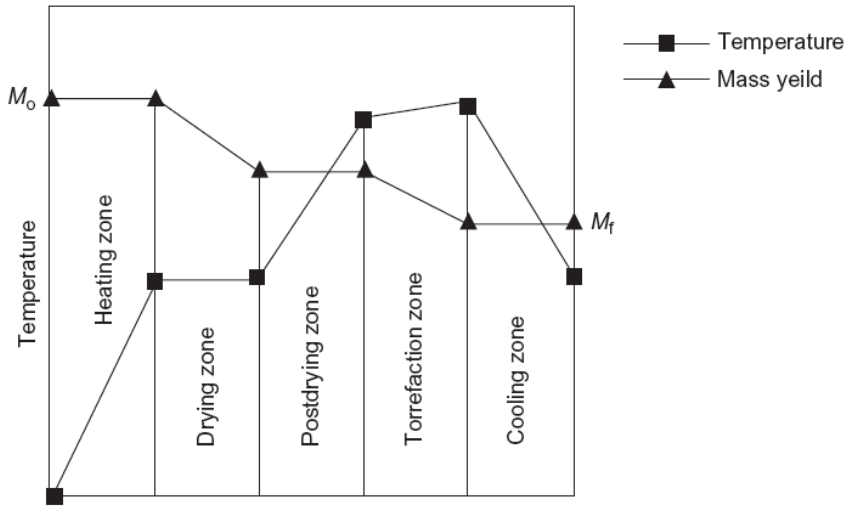
2.4.2 หลักการทำงานของกระบวนการทอรีแฟคชัน

ขั้นตอนของการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเริ่มแรกเป็นขั้นตอนการทำความร้อน อัตราการทำความร้อนควรต่ำกว่า 50 K/min ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงช่วงอุณหภูมิของ



รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการดำเนินการของกระบวนการทอรีแฟคชัน

การอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 363.15 – 378.15 K จากนั้นได้มีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งที่อยู่ในช่วงของกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 473.15 – 573.15 K และสุดท้ายช่วงการทำเย็นทำให้อุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง [20]



รูปที่ 2.4 แสดงอุณหภูมิและมวลสูญเสียในกระบวนทอรีแฟคชั่น [8]

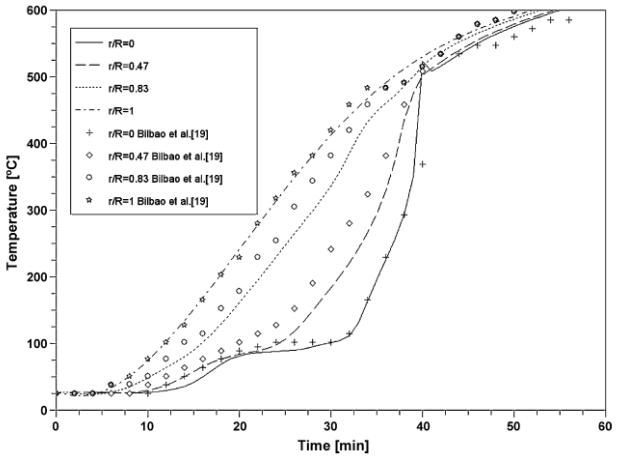
จากรูปที่ 2.4 Basu และคณะ [8] ได้รายงานขั้นตอนการให้ความร้อนในกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

ระยะให้ความร้อน (Heating zone) คือเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการ เมื่อชีวมวลถูกให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิการอบแห้ง (~373.15 K) อุณหภูมิของชีวมวลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยความร้อนสัมผัสจากเตาปฏิกรณ์หรือแหล่งให้ความร้อน

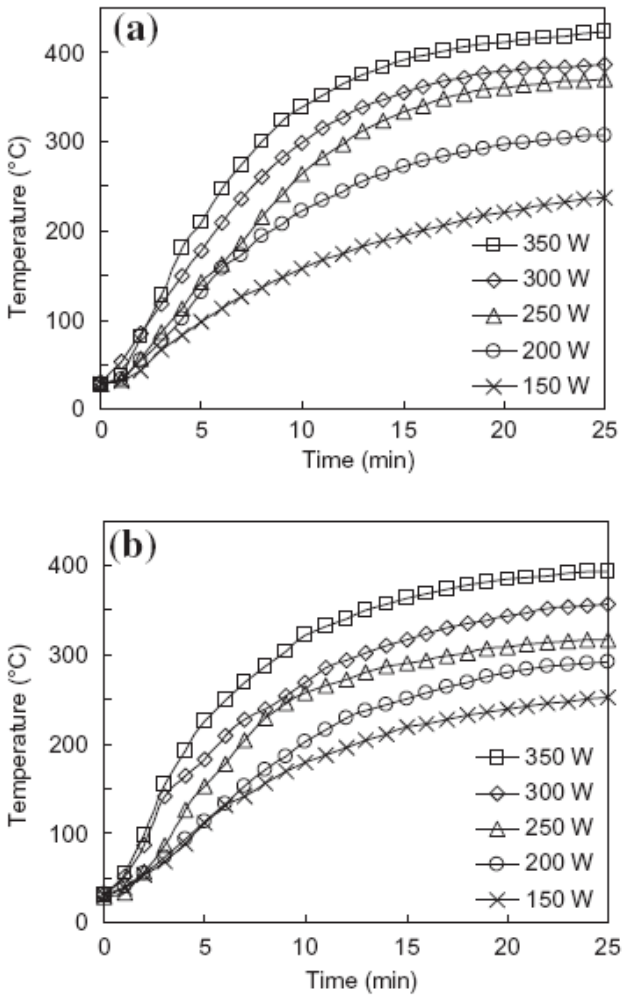
ระยะทำระเหย (Drying zone) คือจะถูกพบในชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูง อุณหภูมิจะเริ่มตั้งแต่เมื่อน้ำเริ่มระเหยออกจากชีวมวลด้วยความร้อนแฝง

ระยะหลังทำระเหย (Postdrying zone) คือเมื่อชีวมวลถูกอบแห้ง อุณหภูมิเริ่มนับตั้งแต่เมื่อน้ำระเหยจนหมดจนกระทั่งถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น (473.15 K)

ระยะทอรีแฟคชั่น (Torrefaction zone) คืออุณหภูมิจะถูกให้ความร้อนตั้งแต่ 473.15 – 573.15 K



รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดนิ่งในระดับห้องปฏิบัติการ



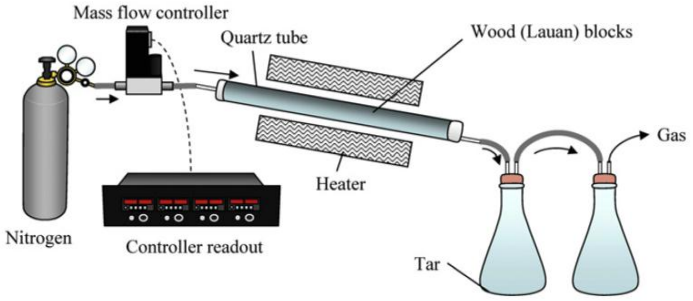
รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 2.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดนิ่งในระดับห้องปฏิบัติการ จากงานวิจัยของ Ratte และคณะ [21] ที่ได้ดำเนินการทอรีไฟร์ไม้ทรงกลมที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมระยะเวลา 60 นาทีและรูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับห้องปฏิบัติการ จากงานวิจัยของ Huang และคณะ [22] ที่ได้ดำเนินการทอรีไฟร์ฟางข้าวและพืชน้ำด้วยกำลังของคลื่นไมโครเวฟ 150, 200, 250, 300 และ 350 W ตามลำดับ ระยะเวลา 25 นาที พบว่า ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิแค่ 3 ระยะคือ ระยะให้ความร้อน ระยะทำระเหยและระยะทอรีแฟคชั่น

2.4.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น

2.4.3.1 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบด

2.4.3.1.1. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพการทดลองเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ

จะใช้ตะกรับวางในแนวนอนหรือเอียง,ตะกรับที่มีการทิ้งขี้เถ้าและตะกรับที่มีน้ำหล่อเย็น ชีวมวลจะถูกเผาไหม้ที่พื้นผิว วิธีการเผาไหม้แบบนี้เหมาะสมกับชีวมวลที่มีขี้เถ้าน้อย สำหรับเตาที่ใช้ควรเป็นเตาเผาแบบ batch โดยวัสดุเบดจะอยู่นิ่งและทำการเผาไหม้ภายในเตาปฏิกรณ์ แบบ TGA (Termo - gravimeter analyzer) ได้มีการทำการศึกษาผลของการทอรีแฟคชั่นไม้สนพื้นเมืองชนิดหนึ่ง (Lauan) ซังข้าวโพด ไผ่ วิลโล สน ขี้เลื่อยปาล์มน้ำมันด้วยปริมาณ 9.0 – 15 กรัม กับเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ โดยตัวเตาปฏิกรณ์ทำจากท่อเหล็กทรงกระบอกภายในบรรจุชีวมวลที่ต้องการทอรีไฟร์ภายนอกมีแหล่งให้ความร้อนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นทำการป้อนก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นบรรยากาศทำหน้าที่ไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากระบบ เพื่อป้องกันการจุดติดไฟภายในด้วยอัตราการไหลของ

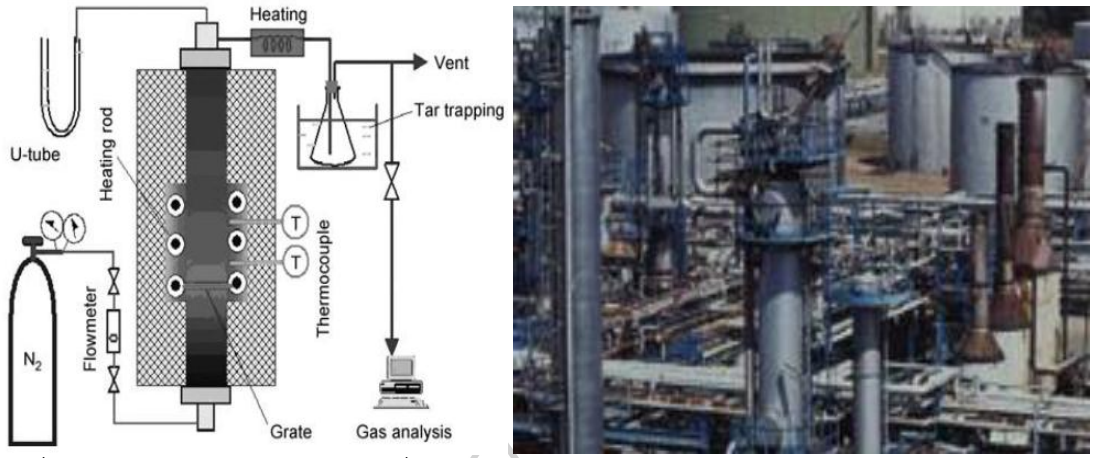
ไนโตรเจน 0.05 – 0.1 L/min โดยผ่านมาตรการวัดด้วยเครื่องมือ การวัดอัตราการไหลของไนโตรเจน จากนั้น ดำเนินการทอร์รีแฟคชั่นด้วยอัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 10 - 30 K/min จนอุณหภูมิถูกยกไปถึงอุณหภูมิทอร์รีแฟคชั่นที่ต้องการอยู่ในช่วง 493.15 – 553.15 K ด้วยระยะเวลาทอรีแฟคชั่น 0.5 - 2 ชั่วโมง พบว่า ค่าความร้อนอยู่ในช่วง 17 – 25 MJ/kg ซึ่งเพิ่มขึ้นจากชีวมวลดิบในช่วง 5.2 - 14.5 MJ/kg ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น 2 – 19 wt% ผลได้พลังงานและมวลลดลง 3 – 45 wt% และ 1 – 35 wt% ตามลำดับ [11, 12, 19] และเมื่อความชื้นเริ่มต้นยิ่งสูงส่งผลให้มวลและพลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ได้ถึง 33 wt% [23] และลดปริมาณความชื้นได้ดีด้วย [7] และแผนภาพการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.4.3.1.2. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดในระดับกึ่งอุตสาหกรรม

มีพื้นฐานของการสร้างและหลักการทำงานมาจากระดับห้องปฏิบัติการ โดยแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าระบบได้จากการเผาไหม้ชีวมวลดิบโดยตรง ซึ่งโดยปกติแหล่งให้ความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบในระดับห้องปฏิบัติการจะเป็นเครื่องให้ความร้อนไฟฟ้าและเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ไม่สามารถดำเนินการอย่างต่อเนื่องได้ ศูนย์วิจัยพลังงานของประเทศเนเธอร์แลนด์ได้ออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้พร้อมทำการทอรีแฟคชั่นไม้สนพื้นเมือง ด้วยกำลังการผลิต 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [14]

2.4.3.1.3. เตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบดในระดับเชิงอุตสาหกรรม

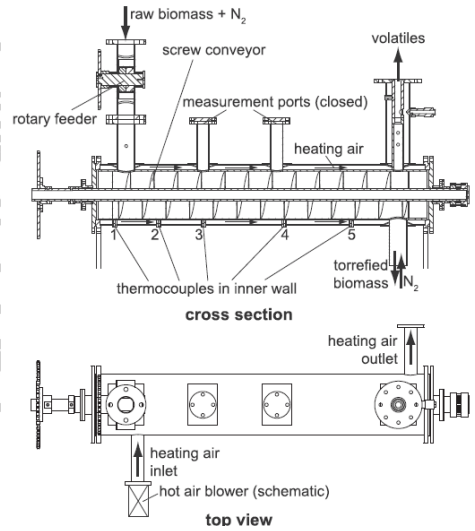
จะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับเตาปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบดในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ดำเนินการโดยการใส่ชีวมวลดิบหรือชีวมวลที่ต้องการทอรีไฟร์ที่ด้านบนสุดของเตาปฏิกรณ์ โดยชีวมวลนั้นจะผ่านกระบวนการทำแห้งและทอรีไฟร์ภายในเตาปฏิกรณ์ ในระหว่างกระบวนการจะมีสารระเหย ไอน้ำและก๊าซคอนเดนเซสอื่นๆที่ออกมาในบริเวณด้านบนของเตาปฏิกรณ์ออกจากสู่สิ่งแวดล้อมและจะได้ผลิตภัณฑ์ทอรีไฟร์ในบริเวณด้านใต้ของเตาปฏิกรณ์ ซึ่งในปี ค.ศ.2010 บริษัทอินเทโกรฟลูเอล ได้ดำเนินการสร้างเตาปฏิกรณ์รูปแบบนี้ โดยมีกำลังการผลิตชีวมวลทอรีไฟร์ 48,000 ตันต่อปี พบว่าการกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์ [14] และในค.ศ. 2012 บริษัทพาร์คเกอร์ออโต้เครฟเอนจิเนีย (Parker Autoclave Engineers) [24]และบริษัทนูเอิทซ์อีโคเทคโนโลยี (New earth eco center) ประเทศสหรัฐอเมริกา [25] ได้พัฒนาและปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ประเภทนี้ขึ้นมาเช่นกัน ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดในระดับเชิงอุตสาหกรรม โดยบริษัทพาร์คเกอร์ออโต้เครฟเอนจิเนีย ที่มา http://www.autoclaveengineers.com

2.4.3.2 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่

2.4.3.2.1. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่ในระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.9 แสดงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรูในระดับห้องปฏิบัติการ

จะใช้ตะกรับที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า ตะกรับที่เคลื่อนที่ไปข้างหลัง ตะกรับแบบเป็นขั้นและตะแกรงคล้ายบานเกล็ด สำหรับการทำงานของเตาที่มีวิธีการเผาไหม้แบบนี้ คือตะกรับจะค่อยๆเคลื่อนที่และถูกแบ่งเป็นโซนเผาไหม้และโซนหลังจากเผาไหม้ เนื่องจากมีการปล่อยขี้เถ้าอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตะกรับมีขนาดใหญ่ เพื่อลดการกีดขวางของขี้เถ้าในการเผาไหม้ สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ได้ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบสกรูในระดับห้องปฏิบัติการเป็นชนิดหนึ่งของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่ ได้มีการทำการศึกษาประสิทธิภาพการ

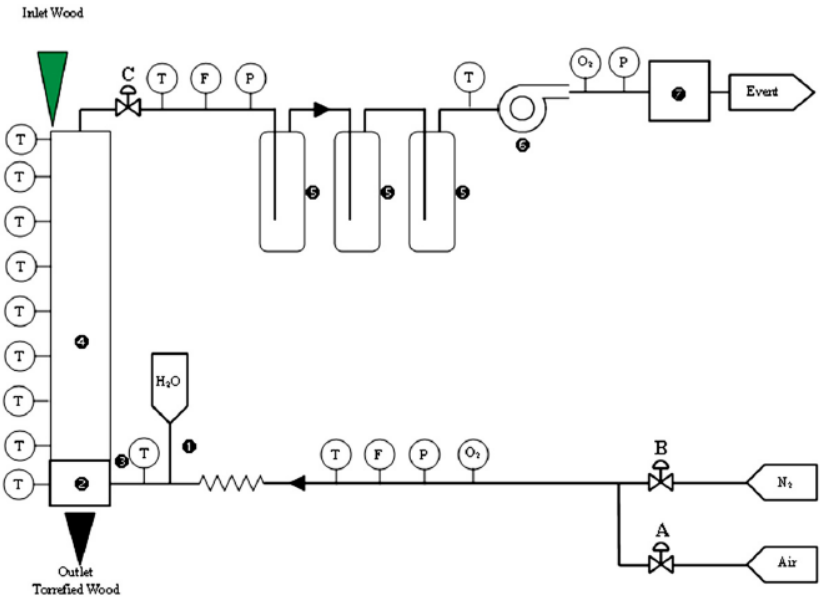
เผาไหม้ วัดความร้อนปลดปล่อยในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชันรวมทั้งสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของชีวมวลไม้บีช ไม้ซีดาร์และวิลโล ตามลำดับ ด้วยความเร็วอยู่ในช่วง 5 – 10 rpm โดยมีอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นอยู่ระหว่าง 523.15 และ 573.15 K ระยะเวลาในการทอรีแฟคชั่น 20 ถึง 60 นาที ซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 3 - 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมงภายใต้บรรยากาศเฉื่อยไนโตรเจน สรุปได้ว่าความร้อนของทอรีแฟคชั่นอยู่ระหว่าง -199 ถึง 148 kJ/kg [26] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นส่งผลให้ลดการใช้พลังงานการบดของชีวมวลทอรีไฟร์ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซกู้คืนต่ำระยะเวลาทอรีแฟคชั่นส่งผลต่อผลได้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ เพิ่มค่าความร้อนและความสามารถในการบดที่ดี [27] ดังแสดงในรูปที่ 2.9

2.4.3.2.2. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม

จะมีลักษณะการทำงานด้วยการทำการทอรีแฟคชั่นชีวมวลอย่างต่อเนื่อง Ratte และคณะ [3] ได้ทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อยืนยันการออกแบบและความเหมาะสมของเตาปฏิกรณ์ TORSPYD (Thermya company has developed and patented a biomass torrefaction/depolymerisation process) ซึ่งมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 3 - 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.10

2.4.3.2.3. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่ในระดับอุตสาหกรรม

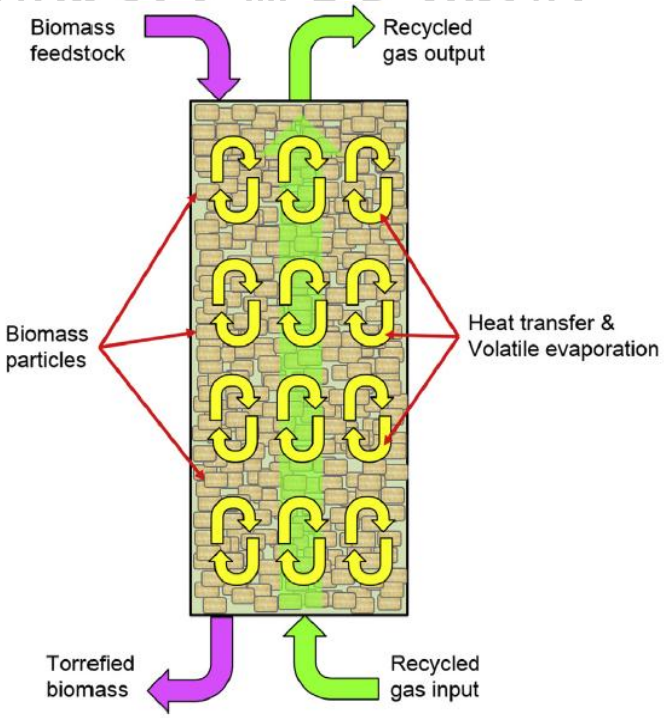
งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาทอรีไฟร์ผ่านเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้โดยมีชีวมวลวิลโลด้วยกำลังการผลิต 1.45 กิโลกรัมต่อวินาทีและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นและออกแบบกระบวนการ ผลแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราการไหลของก๊าซกู้คืนต่ำระยะเวลาทอรีแฟคชั่นส่งผลต่อผลได้พลังงาน เพิ่มค่าความร้อนและความสามารถในการบดที่ดี [3]



❶: Water injection ; ❷ Injection chamber of hot gas and torrefied wood recovery; ❸ Grid ; ❹ Thermal column containing the biomass beforehand conditioned in terms of size and geometry; ❺ Gas dryer with basic, acid and neutral bath ; ❻ Fan Combustion chamber ; ❼ Gas treatment

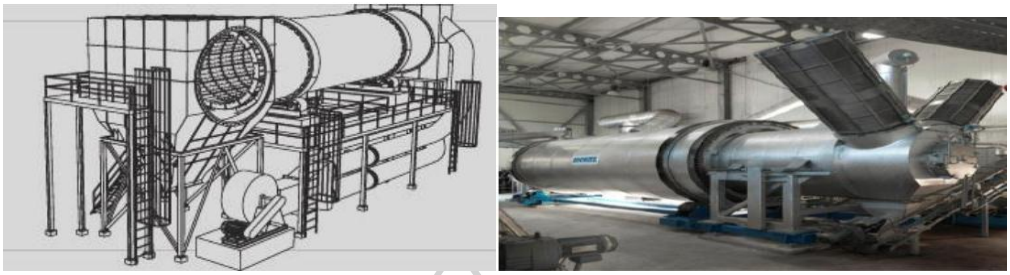
A, B, C, D : Valves

รูปที่ 2.10 แสดงไดอาแกรมเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม (TORSPYD)



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่ในระดับอุตสาหกรรม

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่แบบโรตารี่ดรัมในระดับอุตสาหกรรม ในปีค.ศ. 2013 บริษัทเทอมเมอร์ (Thamer) ได้สร้างเตาปฏิกรณ์ประเภทนี้

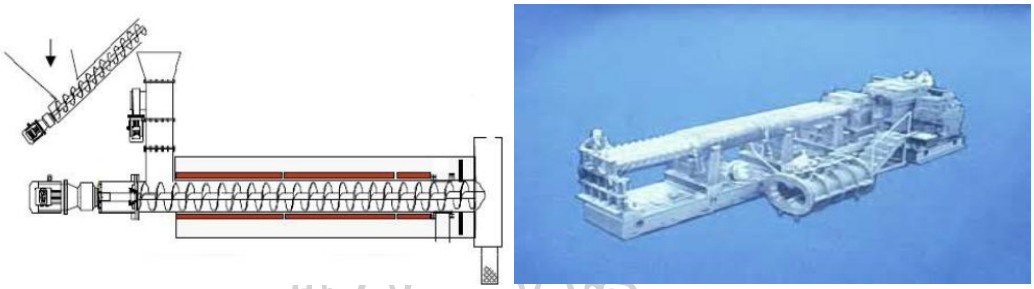


รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่แบบโรตารี่ดรัม ในระดับอุตสาหกรรม โดยบริษัทเทอมเมอร์

ขึ้นมาซึ่งสามารถให้ความร้อนได้แบบโดยตรงและโดยอ้อม มีการส่งผ่านความร้อนอย่างสม่ำเสมอ สามารถดำเนินการทอรีแฟคชั่นได้ในชีวมวลหลายขนาดและหลายชนิด ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สามารถนำมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ภายเตาปฏิกรณ์ กระบวนการสามารถดำเนินการได้โดยการควบคุมอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ความเร็วการหมุนของดรัม และองศาของดรัมที่ทำกับแนวระดับ พบว่าอัตราเร็วในการหมุนต่ำจะทำให้ชีวมวลอยู่ในสถานะคาร์บอนไนเซชันมากกว่าที่เป็นชีวมวลในสถานะทอรีแฟคชั่น อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราเร็วในการหมุนของดรัมสูงมากเกินไปชีวมวลทอรีไฟร์ที่ได้ก็จะมีคุณภาพที่ต่ำ ดังนั้น จึงต้องใช้อัตราเร็วและความร้อนที่เหมาะสมในการทอรีไฟร์สำหรับชีวมวลด้วย เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่แบบโรตารี่ดรัมในระดับอุตสาหกรรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ยังมีบริษัทที่นำเทคโนโลยีประเภทนี้ไปปรับปรุงและพัฒนาต่อในเชิงการค้าได้แก่ บริษัท Airless สหราชอาณาจักร ใช้เทคโนโลยี CDS ที่มีกำลังการผลิต 50 กิโลตันต่อปี บริษัท Torr - coal ประเทศเนเธอร์แลนด์ใช้เทคโนโลยีประเภทนี้ทอรีแฟคชั่นร่วมกับถ่านหินที่มีกำลังการผลิต 35 กิโลตันต่อปีบริษัท BIO3D สาธารณรัฐฝรั่งเศส บริษัท EBES AG เครือรัฐออสเตรเลีย บริษัท 4Energy Evest ราชอาณาจักรเบลเยียม มหาวิทยาลัย ETPC - Umea University ราชอาณาจักรสวีเดน ใช้เทคโนโลยีประเภท BioEndev ที่มีกำลังการผลิต 25 – 35 กิโลตันต่อปี BioEndev/E และบริษัทAtmosclear สาธารณรัฐประชาชนจีนที่มีกำลังการผลิต 50 กิโลตันต่อปี ประเทศออสเตรเลีย บริษัท Andritz ใช้เทคโนโลยีประเภท ACB/ECN ที่มีกำลังการผลิต

50 กิโลตันต่อปีและประเทศสเปน บริษัท Torkapparater มีกำลังการผลิต 100 กิโลตันต่อปี [28]

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่แบบสกรูคอนเวอร์เยอร์ในระดับอุตสาหกรรม ในปี ค.ศ.เดียวกันบริษัทซิงค์โค (Syncoal) ได้พัฒนาซึ่งสามารถสร้างได้ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง ในขณะที่สกรูทำการหมุนชีวมวลภายในรีแอคเตอร์จะถูกหมุนไปด้วยพร้อมๆกัน



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่แบบสกรูคอนเวอเยอร์ในระดับอุตาสาหกรรมโดยบริษัทซิงค์โค

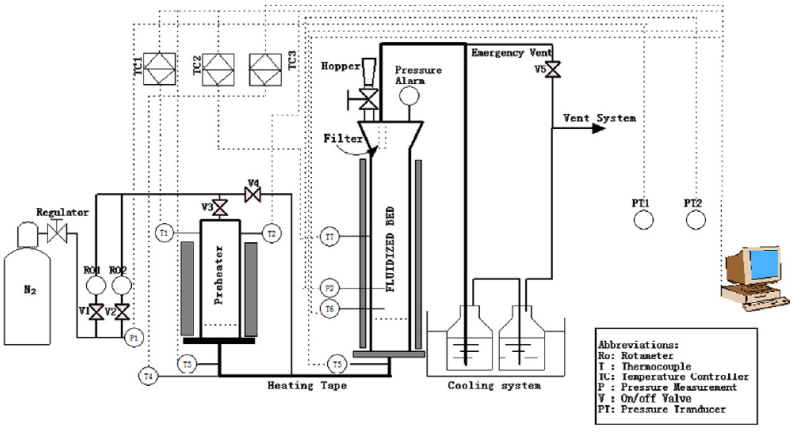
ทั้งให้ความร้อนระหว่างผนังของรีแอคเตอร์และชีวมวลที่สามารถให้ความร้อนได้โดยตรง ชีวมวลทอรีไฟร์ที่ได้จะมีคุณภาพสูง ความหนาแน่นต่ำและความชื้นจะถูกปรับปรุงตั้งแต่เริ่มต้นนำชีวมวลเข้ารีแอคเตอร์จนกระทั่งถูกสกรูผลักออกมาเป็นชีวมวลทอรีไฟร์ [29] ประเทศเนเธอแลนด์บริษัท BioLake BV/ATO บริษัท BTG และบริษัท Foxcoal ได้ใช้เทคโนโลยีประเภทนี้ผลิตชีวมวลทอรีไฟร์เชิงการค้าที่มีกำลังการผลิต 5 – 10 กิโลตันต่อปี 5 ตันต่อชั่วโมง และ 35 กิโลตันต่อปีตามลำดับ [30] ดังแสดงในรูปที่ 2.13

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่แบบเบลท์ดายเออร์ในระดับอุตสาหกรรมเป็นเตาปฏิกรณ์ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ดี ทำการควบคุมช่วงเวลาทอรีแฟคชั่นด้วยความเร็วของสายพาน สามารถทอรีแฟคชั่นชีวมวลได้หลายขนาด มีต้นทุนต่ำ ในปัจจุบันมีบริษัทเชิงการค้าหลายบริษัทนำเทคโนโลยีประเภทนี้ไปสร้างในเชิงการค้า ได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา บริษัท Agri - Tech producers LLC/RTF ได้ทำการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ เพื่อใช้ในกระบวนการเทคโนโลยีทอรีไฟร์ชีวมวล ที่มีกำลังการผลิต 5 ตันต่อชั่วโมง บริษัท New Earth Eco Technology ได้ทำการสร้างโดยใช้เทคโนโลยี Eco - Pyrovac ที่มีกำลัง การผลิต 2 ตันต่อชั่วโมง ประเทศเบลเยียม บริษัท 4 Energy Investe Amel Biocoal ได้ทำการสร้างโดยใช้เทคโนโลยี

Stramproy ที่มีกำลังการผลิต 38 กิโลตันต่อปีและประเทศเนเธอแลนด์ บริษัท Stramproy Green Investment ได้ทำการสร้างโดยใช้เทคโนโลยี Stramproy ที่มีกำลังการผลิต 45 กิโลตันต่อปี

2.4.3.3 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิไดซ์เบด

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิไดซ์เบดแบ่งเป็นการเผาไหม้ระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศและการเผาไหม้ระบบฟลูอิเบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ทรายเป็นวัสดุเบด ทรายและเชื้อเพลิงที่อยู่ในเตาหลอมนั้นอยู่ในสภาวะเดือดที่มีความดันของอากาศในการเผาไหม้สูงและเกิดการเผาไหม้ผ่านความร้อนที่กักเก็บในทรายและผลการส่งผ่านความร้อนของทรายเหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงและคุณภาพต่ำ เตาปฏิกรณ์ชนิดนี้ทำงานโดยนำชีวมวลวางไว้ที่เบดเพื่อให้อากาศไหลผ่าน ชีวมวลจะลอยขึ้น มีแหล่งให้ความร้อนจากภายนอกส่งผลให้เบดได้รับความร้อน ทำให้ความร้อนทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์มีความสม่ำเสมอ Li และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาทอรีแฟคชั่นขี้เลื่อย ผ่านเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิไดซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า ขี้เลื่อยทอรีไฟร์มีค่าความร้อนสูง มีความไม่ชอบน้ำ ประสิทธิภาพของเตาปฏิกรณ์นี้สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ Rousset และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการฟลูอิไดเซชันของไม้ยูคาลิปตัส ในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิไดซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการวัดความดันตกคร่อมของเบดที่เป็นฟังก์ชันของความเร็วอากาศพบว่าความดันตกคร่อมส่งผลต่อขนาดอนุภาคโดยตรง

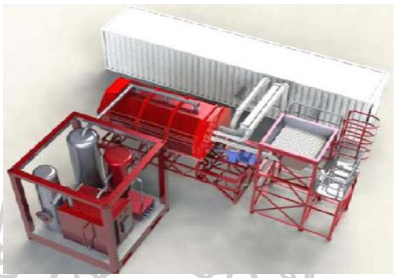


รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบฟลูอิไดซ์เบดในระดับห้องปฏิบัติการ

2.4.3.4 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟ

2.4.3.4.1. เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรม

จะดำเนินการโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความยาวคลื่น 300 MHz ถึง 300 GHz แต่ทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปใช้ปริมาณที่ 2.45 GHz ซึ่งถือเป็นความร้อนที่เพียงพอแล้ว ข้อดีของเตาปฏิกรณ์ประเภทนี้คือสามารถให้ความร้อนไปสู่ชีวมวลได้ทั้งระบบ [32] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับอุตสาหกรรม

2.4.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับกระบวนการทอรีแฟคชั่น งานวิจัยส่วนใหญ่อาศัยแนวคิดทางทฤษฎีความร้อน กำหนดพารามิเตอร์ดำเนินการต่างๆเพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม ได้แก่ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ระยะเวลาทอรีแฟคชั่น ประเภทวัสดุและชีวมวล ปริมาณความชื้นและขนาดอนุภาค [3] มีการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นเชิงจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา (Reaction kinetic) เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของของแข็ง ซึ่งของแข็งที่ทำการทอรีแฟคชั่นคือวิลโล ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองกลไกแบบสองขั้นตอน (Two - step torrefaction mechanism) [33]และในหลายๆงานวิจัยได้มีการปรับปรุงแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิคการถดถอยเชิงสถิติ เพื่อคำนวณผลได้ของแข็งโดยอาศัยตัวแปรดำเนินการคือ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ระยะเวลาที่ใช้ทอรีแฟคชั่น และปริมาณความชื้นเริ่มต้น [34] อย่างไรก็ตาม ได้มีการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายองค์ประกอบของสารระเหยและของแข็งและตรวจสอบผลการทดลองด้วย Bates and Ghoniem [35] ยังได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปฏิกิริยาอุณหเคมี (Reaction thermochemistry) เพื่อประเมินเอนทาลปีทอรีแฟคชั่นที่นำไปสู่การพิจารณาสมดุลพลังงานของเตาปฏิกรณ์ Peduzzi และคณะ [36] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อประเมินสมดุลมวลและพลังงานของ

กระบวนการทอรีแฟคชั่น Park และคณะ [37] ได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น โดยอาศัยแบบจำลองกลไกและแบบจำลองอุณหเคมีเพื่อประเมินผลได้ของแข็งและอาศัยแบบจำลองการส่งผ่านความร้อนเพื่อประเมินองค์ประกอบของสารระเหย ศึกษาการคำนวณโปรไฟล์อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ มีการพิจารณาสมดุลพลังงานระหว่างก๊าซพาความร้อนและชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ ชีวมวลที่ใช้ในการทำการศึกษาคือวิลโลล์ พบว่าระยะเวลาทอรีแฟคชั่นส่งผลต่อผลได้พลังงานอย่างเล็กน้อยเมื่ออัตราการไหลของก๊าซกู้คืนมีค่าต่ำ

2.4.5 ทฤษฎีการทำระเหย

กระบวนการทำระเหยจะขึ้นอยู่กับอากาศและคุณสมบัติของวัสดุ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการคืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมและความชื้นในวัสดุนั้นๆ นั่นคือธรรมชาติของวัสดุเอง ประกอบด้วยองค์ประกอบและโครงสร้าง อุณหภูมิ ความดัน และปริมาณความชื้น [38]

ปริมาณความชื้นของวัสดุคือน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของมวลหรือน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของมวลแห้ง สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือปริมาณความชื้นแบบเปียกและปริมาณความชื้นแบบแห้ง โดยปริมาณความชื้นแบบเปียก (X_w) คือสัดส่วนของปริมาณความชื้นแบบแห้งต่อปริมาณความชื้นแบบแห้งบวกหนึ่งและปริมาณความชื้นแบบแห้ง (X) คือสัดส่วนของปริมาณความชื้นแบบเปียกต่อหนึ่งลบด้วยปริมาณความชื้นแบบเปียกสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$X_w = \frac{X}{X+1} \text{ และ } X = \frac{X_w}{1-X_w}$$

สัดส่วนความชื้น (MR) คือ ปริมาณความชื้นของวัสดุในระหว่างการทำแห้งของปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆลบปริมาณความชื้นสมดุลต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นลบปริมาณความชื้นสมดุลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$$

แอคทีวิตี้ของน้ำ (Water activity) คือ ค่าความชื้นที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$a_w = \frac{P_w}{P_w^0} = \frac{RH}{100}$$

เมื่อ P_w คือความดันย่อยของไอน้ำ P_w^0 คือความดันไออิ่มตัว และ RH คือปริมาณความชื้นสัมพัทธ์

ปริมาณความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือปริมาณความชื้นเกาะเกี่ยวและปริมาณความชื้นที่ผิวอิสระ ปริมาณความชื้นเกาะเกี่ยวคือปริมาณความชื้นที่ยึดกันด้วยแรงพันธะภายในวัสดุด้วยการดูดซับเชิงกลและปริมาณความชื้นที่ผิวอิสระคือปริมาณของน้ำที่ผิวที่ยึดกันด้วยแรงคาปิลลารี

ปริมาณความชื้นสมดุลคือปริมาณความชื้นของวัสดุที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ โดยทั่วไปจะพิจารณาจากการพล็อตกราฟระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือแอคติวิตี้ของน้ำที่อุณหภูมิคงที่

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้สามารถสรุปได้ว่า ได้มีการดำเนินการปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับที่พัฒนามาจากเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดในเชิงอุตสาหกรรมด้วยการทำให้ชีวมวลเคลื่อนที่เพื่อการรับความร้อนที่ทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์ด้วยเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดเคลื่อนที่ แต่สำหรับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับกึ่งอุตสากรรมที่มีการพัฒนามาจากเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นในระดับห้องปฏิบัติการประเภทให้ความร้อนด้วยแหล่งให้ความร้อนภายนอกในลักษณะของชีวมวลและเตาปฏิกรณ์ที่อยู่นิ่งตั้งฉากกับแนวระดับนั้น พบว่า การกระจายของอุณหภูมิยังไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์เนื่องจากการส่งผ่านความร้อนได้ไม่ดีจึงจำเป็นต้องปรับปรุงข้อเสียนี้ โดยนำท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนที่อาศัยหลักการทำงานการส่งผ่านความร้อนของสารทำงานในระบบสุญญากาศ เพื่อการส่งผ่านความร้อนทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์ ดังนั้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบด้วยท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนผ่านหลักการทำงานของการส่งผ่านความร้อนของสารทำงานในระบบสุญญากาศสำหรับใช้ในการส่งผ่านความร้อนจากท่อเทอร์โมไซฟอนไปยังเตาปฏิกรณ์ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในช่วงระยะให้ความร้อนจนถึงระยะทำระเหย ที่อุณหภูมิเป้าหมายของชีวมวลมีค่า 493.15 K เนื่องจากไม่มีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีในช่วงอุณหภูมินี้ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนโดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์จะอาศัยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่พิจารณาในปริมาตรควบคุมแบบ Uniform – State, Uniform - Flow Process (USUF) ใช้วิธีการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบรุงเงคุตต้าอันดับที่สี่ 4 (Runge - Kutta 4^{th} order method for ordinary differential equations) และทำการคำนวณด้วยโปรแกรม Matlab 2014 พร้อมทั้งทำนายลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น

ชนิดเทอร์โมไซฟอน ได้แก่ อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล สำหรับแหล่งให้ความร้อนคือก๊าซหุงต้ม (LPG)

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การสร้างแบบจำลองทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน” มีรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 แผนการวิจัย

3.2 แผนการทดลอง

3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์

3.4 วิธีการทดลอง

3.5 วัตถุดิบและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

3.6 ระยะเวลาการทดลอง

3.7 สถานที่ทำการทดลอง

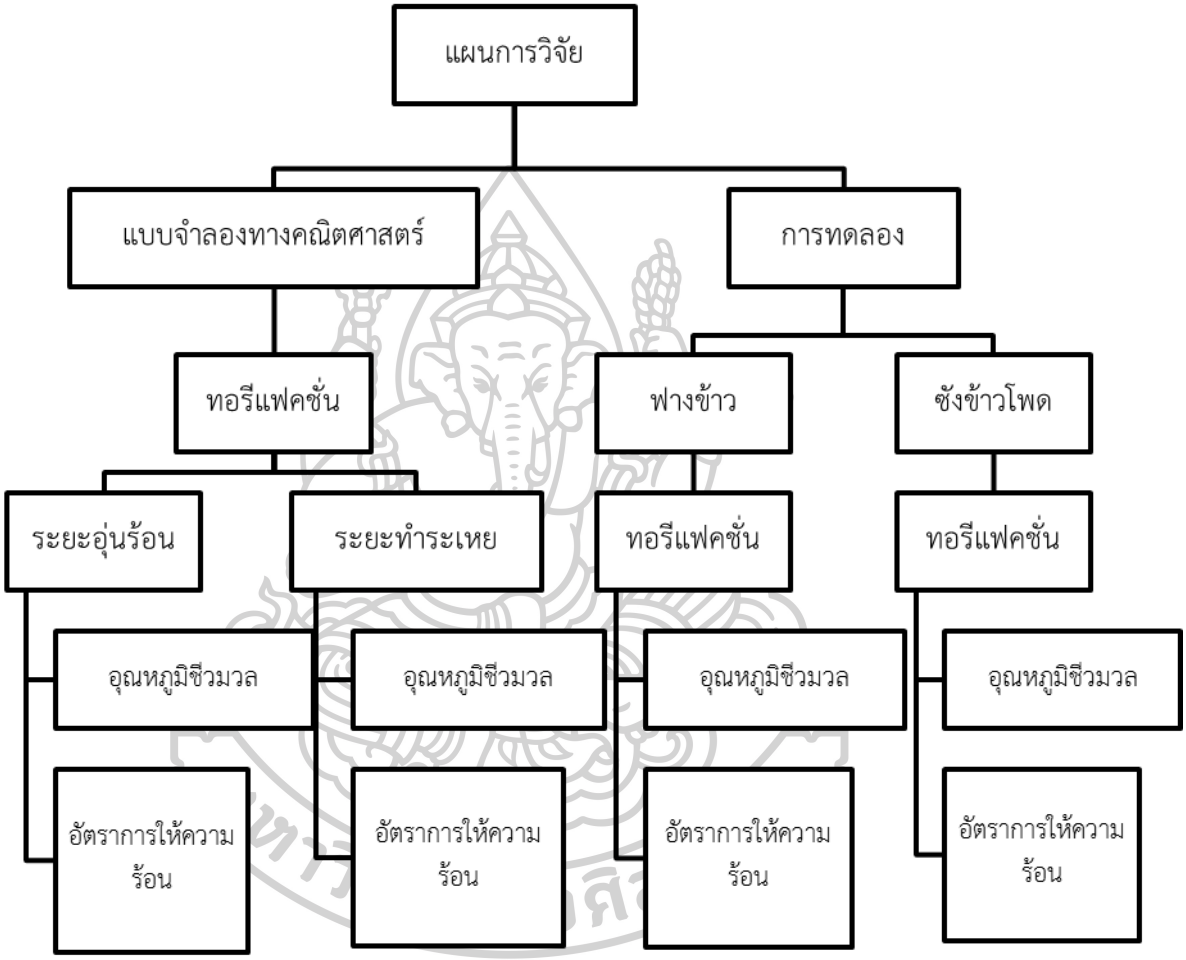
3.8 งบประมาณการวิจัย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยได้ทำการวิจัยลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย เนื่องจากชีวมวลยังไม่มีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีในช่วงนี้ รูปที่ 3.1 แสดงแผนการวิจัยของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนสามารถแบ่งการวิจัยได้เป็นสองส่วนคือการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์และการทดลอง การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์มีสองแบบจำลองคือแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในระยะอุ่นร้อนและแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในระยะทำระเหย เพื่อทำนายลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน การทดลองได้ดำเนินการทำการทดลองทอรีแฟคชั่นชีวมวลคือฟางข้าวและซังข้าวโพด เพื่อสังเกต

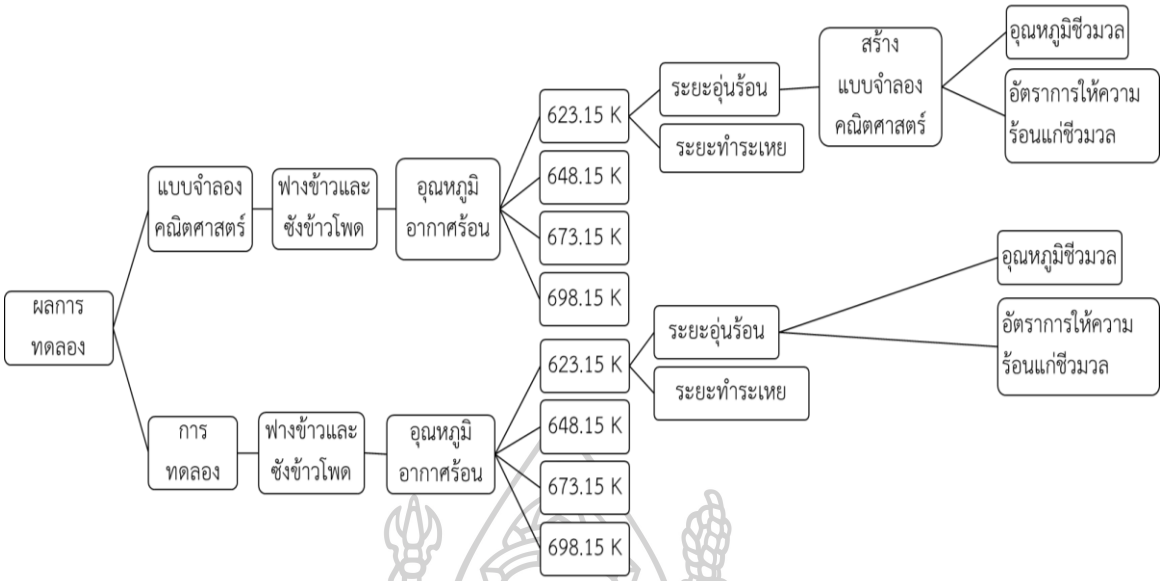
พฤติกรรมของการกระจายของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนและอัตราการให้ความร้อนตั้งแต่ระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนเพื่อยืนยันผลการทดลอง



รูปที่ 3.1 แสดงแผนการวิจัยของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

3.2 แผนการทดลอง

รูปที่ 3.2 แสดงแผนการทดลองของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือแบบจำลองคณิตศาสตร์และการทดลอง การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ



รูปที่ 3.2 แสดงแผนการทดลองของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

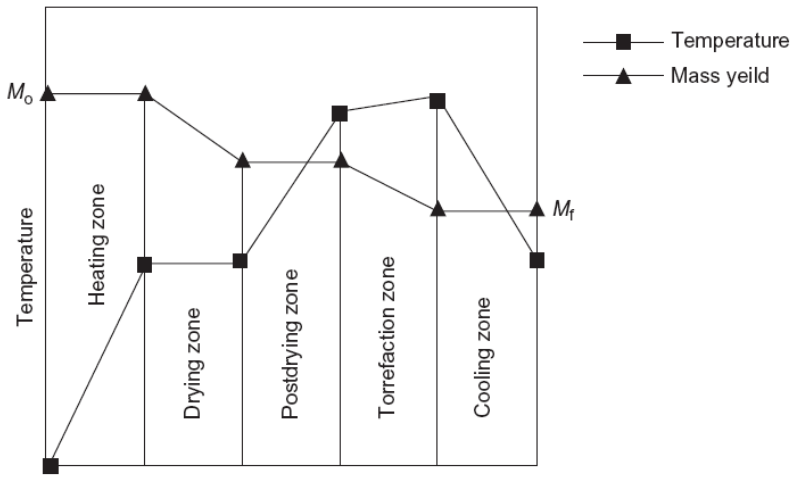
เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน เนื่องจากชีวมวลยังไม่มีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีในช่วงนี้ ได้ทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยแบ่งออกเป็น 2 ระยะคือระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย ในระยะอุ่นร้อนอุณหภูมิจะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิก่อนน้ำระเหยออกจากชีวมวลคืออยู่ในช่วงอุณหภูมิ 307.15 – 373.15 K ระยะทำระเหยจะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหยออกจากชีวมวลจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายคืออยู่ในช่วงอุณหภูมิ 373.15 – 493.15 K เพื่อจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนและคำนวณอัตราการให้ความร้อนนี้ด้วย สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองคือที่เวลาที่นาทีที่ 1 ที่อุณหภูมิ 307.15 K สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นของอากาศร้อนคือ 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K สำหรับการทดลอง ได้ดำเนินการทำการทดลองทอรีแฟคชั่นชีวมวลคือฟางข้าวและซังข้าวโพดโดยการควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนที่เป็นแหล่งให้ความร้อน 4 ค่าด้วยกันคือ 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ และจะดำเนินการให้ความร้อนกับชีวมวลตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิเป้าหมาย 493.15 K ในขณะที่ควบคุมอากาศร้อนนั้นจะต้องทำการลดไฟลงเพื่อให้อุณหภูมิคงที่จนกระทั่งอุณหภูมิของชีวมวลเดินทางไปถึงอุณหภูมิเป้าหมาย เนื่องจากการสะสมความร้อนภายในห้องให้ความร้อนและท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหยด้วย ทั้งนี้กระบวนการให้ความร้อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองระยะคือระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย

ดังนั้น จากแผนการทดลองจะได้รับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหยเพื่อยืนยันผลการทดลอง

3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์

3.3.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

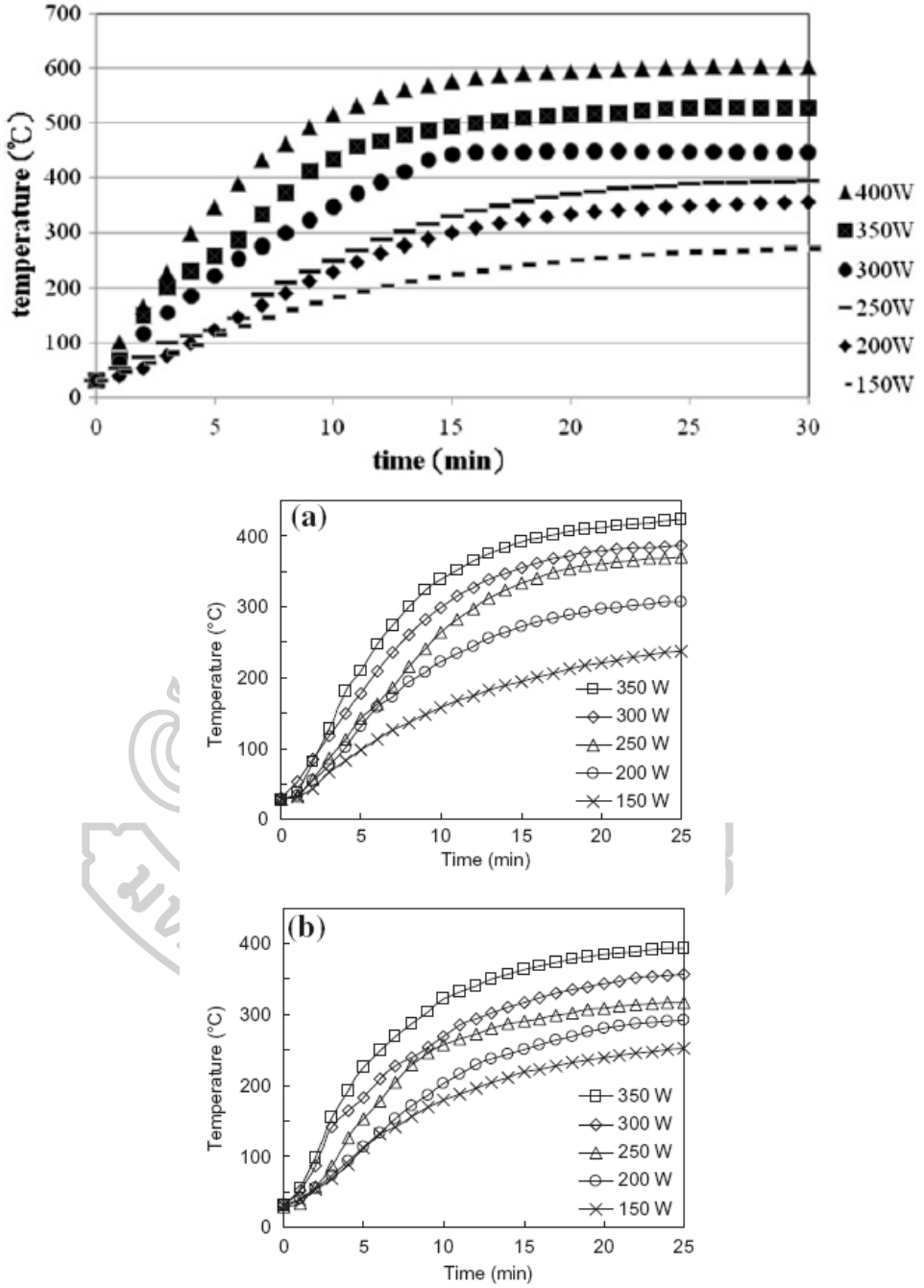
รูปที่ 3.3 แสดงอุณหภูมิและมวลสูญเสียในกระบวนทอรีแฟคชั่น [8] พบว่าลักษณะการให้ความร้อนในช่วงแรกตั้งแต่เริ่มกระบวนการจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เนื่องจากและชีวมวลถูกให้ความร้อนพร้อมๆกันแบบความร้อนสัมผัสและยังไม่เกิดการสูญเสียมวล



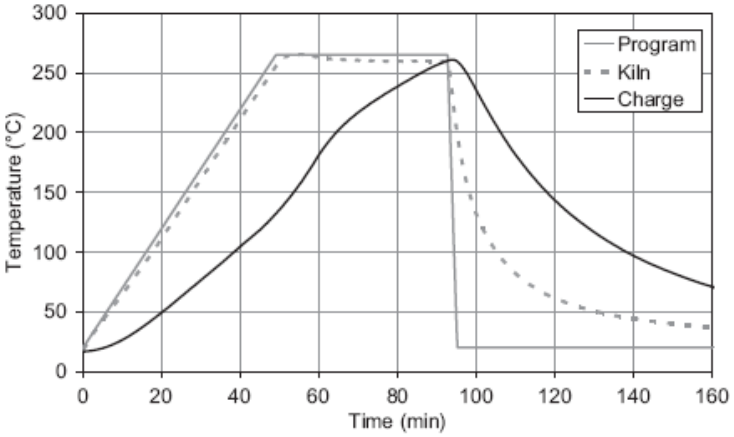
รูปที่ 3.3 แสดงอุณหภูมิและมวลสูญเสียในกระบวนทอรีแฟคชั่น

ในช่วงนี้ จึงเรียกช่วงนี้ว่า ระยะให้ความร้อน หลังจากนั้น ในระยะทำระเหยลักษณะการให้ความร้อนจะขนานกับแนวระนาบ มวลน้ำถูกระเหยด้วยความร้อนแฝงส่งผลให้อุณหภูมิคงที่ อาจเป็นเพราะมีการระเหยของมวลน้ำมากจนความร้อนถูกนำไปใช้ในการระเหยจนหมดจึงไม่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชีวมลในช่วงนี้และในระยะหลังทำระเหยลักษณะการให้ความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นและชีวมวลจะดำเนินการเข้าสู่ช่วงทอรีแฟคชั่นต่อไป รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับห้องปฏิบัติการและรูปที่ 3.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารี่คลินในระดับกึ่งอุตสาหกรรม [27] พบว่า ลักษณะการให้ความร้อนในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้นและหลังจากนั้นอุณหภูมิก็จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิมีค่าคงที่และเข้าสู่ช่วงทอรีแฟคชั่นต่อไป

อาจจะเป็นเพราะน้ำในชีวมวลมีการระเหยน้อยหรือเกิดการระเหยอย่างช้าๆ ความร้อนส่วนใหญ่จึงถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของชีวมวล



รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟในระดับห้องปฏิบัติการ

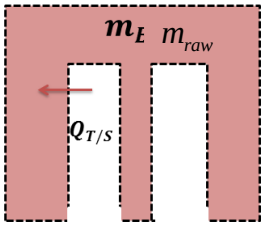


รูปที่ 3.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบโรตารี่คลินในระดับกึ่งอุตสาหกรรม

จากลักษณะการให้ความร้อนที่แตกต่างกันดังที่ได้กล่าวมานี้ เราจึงได้ทำการทอรีแฟคชั่นชีวมวลผ่านเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนตั้งแต่ระยะให้ความร้อนจนถึงช่วงก่อนที่เริ่มเข้าสู่ช่วงทอรีแฟคชั่น เพื่อศึกษาพฤติกรรมการระเหยน้ำในชีวมวลจนถึงอุณหภูมิเป้าหมายและไม่ทำการศึกษาในช่วงทอรีแฟคชั่นเนื่องจากมีการสลายตัวทางความร้อนเชิงเคมีเกิดขึ้น โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นคือที่นาทีที่ 1 มีอุณหภูมิ 307.15 K ภายใต้อุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้มีค่า 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ ฟางข้าวและซังข้าวโพดมีน้ำหนัก 2.4 กิโลกรัม และ 4.5 กิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งสามารถดำเนินการเป็นสองระยะคือ ระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 ช่วงที่ 1 ระยะให้ความร้อน (Heating period)

คือระบบถูกดำเนินการให้ความร้อนในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิก่อนที่น้ำเริ่มระเหยออกจากชีวมวลหรือในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 307.15 - ~ 372.55 K โดยชีวมวลดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้วยความร้อนสัมผัสเพียงอย่างเดียวและไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ พิจารณาสมการรูปแบบ Uniform state uniform flow



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการส่งผ่านความร้อนภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระยะอุ่นร้อน

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} = \frac{dE_{cv}}{dt} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 อัตราการส่งผ่านความร้อนไปสู่ปริมาตรควบคุม ($\dot{Q}_{cv}$) บวกกับผลรวมของมวลที่ไหลเข้า ($\dot{m}_{in}$) คูณกับเอนทาลปี (h_{in}) เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในในปริมาตรควบคุม (E_{cv}) บวกกับผลรวมของมวลที่ไหลออก ($\dot{m}_{out}$) คูณกับเอนทาลปี (h_{out}) จากสมการที่ 1 รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการส่งผ่านความร้อนภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระยะอุ่นร้อน พิจารณาแผนภาพการส่งผ่านความร้อนภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระยะอุ่นร้อน พบว่า ในช่วงอุณหภูมินี้ไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะของสสารและไม่มีมวลไหลเข้าและไหลออก สามารถจัดรูปแบบของสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{cv} = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad (2)$$

เมื่อ $E_{cv} = m_{cv} u_{cv}$ แทนลงในสมการที่ 2 จะได้

$$\dot{Q}_{cv} = \frac{d\left(m_{cv} u_{cv}\right)}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ $u_{cv} = c_{cv} T_{cv}$ แทนลงในสมการที่ 3 จะได้

$$\dot{Q}_{cv} = \frac{dm_{cv} c_{cv} T_{cv}}{dt} \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 มวลของปริมาตรควบคุม (m_{cv}) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและค่าความจุความร้อนของปริมาตรควบคุม (c_{cv}) เปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนั้นอยู่ในช่วงที่สั้น [39] จึงถือว่าสองตัวแปรนี้คงที่และอัตราการส่งผ่านความร้อนไปสู่ปริมาตรควบคุม ($\dot{Q}_{cv}$) เท่ากับอัตราการ

ส่งผ่านความร้อนจากเทอร์โมไซฟอนไปสู่ชีวมวลดิบ ($\dot{Q}_{T/S}$) มวลของปริมาตรควบคุม (m_{cv}) เท่ากับมวลของชีวมวลดิบ ($m_{raw,cv}$) ค่าความจุความร้อนของปริมาตรควบคุม (c_{cv}) เท่ากับค่าความจุความร้อนของชีวมวลดิบ ($c_{raw,cv}$) และอุณหภูมิของปริมาตรควบคุม (T_{cv}) เท่ากับอุณหภูมิของชีวมวลดิบ ($T_{raw,cv}$) สามารถจัดรูปแบบสมการที่ 4 ใหม่ได้ ดังนี้

$$n\dot{Q}_{T/S} = m_{raw,cv}c_{raw,cv}\frac{dT_{raw,cv}}{dt} \tag{5}$$

เมื่อ n คือสัมประสิทธิ์หน้าเทอมของอัตราการส่งผ่านของเทอร์โมไซฟอนไปสู่ชีวมวล นั่นคือจำนวนของท่อเทอร์โมไซฟอน ในที่นี่ มีท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 5 ท่อ (n = 5) และมวลของชีวมวลดิบ ($m_{raw,cv}$) คือมวลของชีวมวลแห้ง ($m_{dry,cv}$) รวมกับมวลของน้ำ ($m_{w,cv}$) นั่นคือ $m_{raw,cv} = m_{dry,cv} + m_{w,cv}$ แทนค่าลงในสมการที่ 5 และจัดรูปแบบของสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 6 ดังนี้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(m_{dry,cv}c_{dry,cv}\frac{dT_{dry,cv}}{dt}\right) + \left(m_{w,cv}c_{w,cv}\frac{dT_{w,cv}}{dt}\right) \tag{6}$$

อัตราการให้ความร้อนของเทอร์โมไซฟอนเท่ากับมวลของชีวมวลแห้งคูณกับค่าความจุความร้อนของชีวมวลแห้งคูณกับอุณหภูมิของชีวมวลแห้งเทียบกับเวลาบวกมวลน้ำคูณกับค่าความจุความร้อนของน้ำคูณอุณหภูมิน้ำเทียบกับเวลา

เมื่อ

$\dot{Q}_{T/S}$ คืออัตราการให้ความร้อนจากเทอร์โมไซฟอน (W)

$T_{dry,cv}$ คืออุณหภูมิของชีวมวลแห้ง (K)

t คือเวลา (min)

$m_{dry,cv}$ คือมวลของชีวมวลแห้ง (kg)

$c_{dry,cv}$ คือค่าความจุวามร้อนของชีวมวลแห้ง (kJ/kgK)

$m_{w,cv}$ คือมวลของน้ำ (kg)

$c_{w,cv}$ คือค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kgK)

$T_{w,cv}$ คืออุณหภูมิของน้ำ (K)

ในระยะนี้ อุณหภูมิของชีวมวลแห้งและน้ำมีค่าเท่ากันเพราะอยู่ในปริมาตรควบคุมเดียวกันและยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาภายใน เพราะฉะนั้น กำหนดให้

$$\left(\frac{dT_{dry,cv}}{dt_{dry,cv}}\right)=\left(\frac{dT_{w,cv}}{dt_{w,cv}}\right)=\left(\frac{dT_{raw,cv}}{dt_{raw,cv}}\right)$$

เมื่อ

$T_{raw,cv}$ คือ อุณหภูมิของชีวมวลดิบ (K)

t คือ เวลา (min)

จัดรูปแบบสมการที่ 6 ใหม่ จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S}=\left(m_{dry,cv}c_{dry,cv}+m_{w,cv}c_{w,cv}\right)\frac{dT_{raw,cv}}{dt} \quad (7)$$

และมวลของน้ำ ($m_{w,cv}$) คำนวณได้จากทฤษฎีการหาปริมาณความชื้นแบบเปียก (Wet basis, X_{wb}) จากนิยาม ปริมาณความชื้นแบบเปียกคือสัดส่วนระหว่างมวลของน้ำกับมวลรวมของชีวมวล ดังสมการที่ 8

$$X_{wb}=\frac{m_{w,cv}}{m_{raw,cv}}x100 \quad (8)$$

เมื่อ

$m_{raw,cv}$ คือมวลรวมของชีวมวล (kg)

จัดรูปแบบสมการที่ 8 ใหม่ จะได้

$$m_{w,cv}=\frac{m_{raw,cv}X_{wb}}{100} \quad (9)$$

แทนค่าสมการที่ 9 ลงในสมการที่ 7 จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(m_{dry,cv}c_{dry,cv} + \left(\frac{m_{raw,cv}X_{wb}}{100} \right) c_{w,cv} \right) \frac{dT_{raw,cv}}{dt} \tag{10}$$

และเนื่องจากต้องการปรับสมการเทอมแรกในตัวแปรของ $m_{dry,cv}$ ในสมการที่ 10 ให้อยู่ในรูป $m_{raw,cv}$ จึงได้นำสมการการคำนวณความชื้นแบบเปียกมาจัดรูปแบบใหม่

จากสมการที่ 8 $\quad X_{wb} = \frac{m_{w,cv}}{m_{raw,cv}} x100$

เมื่อ $m_{w,cv} = m_{raw,cv} - m_{dry,cv}$ แทนค่าลงสมการที่ 8 จะได้

$$X_{wb} = \frac{m_{raw,cv} - m_{dry,cv}}{m_{raw,cv}} x100 \tag{11}$$

จัดรูปแบบสมการที่ 11 ให้สมการอยู่ในรูปของ $m_{dry,cv}$ จะได้

$$X_{wb}m_{raw,cv} = \left(m_{raw,cv} - m_{dry,cv} \right) x100 \tag{12}$$

$$\frac{X_{wb}m_{raw,cv}}{100} = m_{raw,cv} - m_{dry,cv} \tag{13}$$

$$m_{dry,cv} = m_{raw,cv} - \left(\frac{X_{wb}m_{raw,cv}}{100} \right) \tag{14}$$

$$m_{dry,cv} = m_{raw,cv} \left(1 - \frac{X_{wb}}{100} \right) \tag{15}$$

จากสมการที่ 10

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(m_{dry,cv}c_{dry,cv} + \left(\frac{m_{raw,cv}X_{wb}}{100} \right) c_{w,cv} \right) \frac{dT_{raw,cv}}{dt} \tag{10}$$

แทนค่าสมการที่ 15 ลงในสมการที่ 10 จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(\left(m_{raw,cv} \left(1 - \frac{X_{wb}}{100} \right) \right) c_{dry,cv} + \left(\frac{m_{raw,cv}X_{wb}}{100} \right) c_{w,cv} \right) \frac{dT_{raw,cv}}{dt} \tag{16}$$

มหาวิทยาลัยศิลปากร

จัดรูปแบบสมการที่ 16 จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(m_{raw,cv} \left(\left(1 - \frac{X_{wb}}{100} \right) c_{dry,cv} + \frac{X_{wb}}{100} c_{w,cv} \right) \right) \frac{dT_{raw,cv}}{dt} \qquad (17)$$

3.3.1.2 ช่วงที่ 2 ระยะทำระเหย (Dehydration period)

หลังจากชีวมวลดิบ ($m_{raw,cv}$) ซึ่งประกอบด้วยมวลชีวมวลแห้ง ($m_{dry,cv}$) กับมวลน้ำ ($m_{w,cv}$) ได้รับความร้อนในระยะอุ่นร้อนหรือในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่มวลน้ำภายในชีวมวลเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง จากนั้นระบบจะถูกดำเนินการให้ความร้อนต่อไปมวลน้ำภายในชีวมวลเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นช่วงที่ความร้อนทำให้ชีวมวลดิบสูญเสียน้ำหนักจากการระเหยของความชื้น มวลน้ำจะเกิดการระเหยจนกระทั่งถึงปริมาณความชื้นสมดุล โดยสถานะของมวลน้ำเปลี่ยนจากของเหลวกลายไปเป็นไอ ในขณะที่ในช่วงอุณหภูมินี้ไม่สามารถทำให้ ชีวมวลแห้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้

พิจารณารูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพการส่งผ่านความร้อนภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระยะทำแห้ง จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกซ์ สามารถใช้รูปทั่วไปของ *Uniform-State, Uniform-Flow* Process (USUF)

ก.มวลน้ำในชีวมวล ข.มวลน้ำที่ระเหยออกจากชีวมวล

รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพการส่งผ่านความร้อนภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระยะทำแห้ง

อัตราการส่งผ่านความร้อนไปสู่ปริมาตรควบคุมบวกกับผลรวมของมวลที่ไหลเข้าคูณกับเอนทาลปีเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในในปริมาตรควบคุมบวกกับผลรวมของมวลที่ไหลออกคูณกับเอนทาลปี ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} = \frac{dE_{cv}}{dt} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 พิจารณาแผนภาพการส่งผ่านความร้อนภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นระยะทำแห้ง พบว่า ในช่วงอุณหภูมินี้มีมวลน้ำไหลออก ($m_{w,g}$) ด้วยเอนทาลปี (h_g) ในขณะที่ชีวมวลแห้งไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลา สามารถจัดรูปแบบของสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{cv} = \frac{dE_{cv}}{dt} + \dot{m}_{w,g} h_g \quad (18)$$

เมื่อ $E_{cv} = m_{cv} u_{cv}$ แทนลงในสมการที่ 1 จะได้

$$n\dot{Q}_{cv} = \frac{d\left(m_{cv} u_{cv}\right)}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt} h_g \quad (19)$$

และอัตราการส่งผ่านความร้อนไปสู่ปริมาตรควบคุม ($\dot{Q}_{cv}$) เท่ากับอัตราการส่งผ่านความร้อนจากเทอร์โมไซฟอนไปสู่ชีวมวลดิบ ($\dot{Q}_{T/S}$) n คือสัมประสิทธิ์หน้าเทอมของอัตราการส่งผ่านของเทอร์โมไซฟอนไปสู่ชีวมวล นั่นคือจำนวนของท่อเทอร์โมไซฟอน ในที่นี่ มีท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 5 ท่อ (n = 5) มวลของปริมาตรควบคุม (m_{cv}) เท่ากับมวลของชีวมวลดิบซึ่งคือมวลชีวมวลแห้ง ($m_{dry,cv}$) และมวลน้ำ ($m_{w,cv}$) นั่นคือ $m_{raw,cv} = m_{dry,cv} + m_{w,cv}$ สามารถจัดรูปแบบสมการที่ 19 ใหม่ได้ ดังนี้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \frac{d\left(m_{dry,cv} u_{dry,cv}\right)}{dt} + \frac{d\left(m_{w,cv} u_{w,cv}\right)}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt} h_g \quad (20)$$

จัดรูปแบบสมการที่ 20 จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = m_{dry,cv} \frac{du_{dry,cv}}{dt} + u_{dry,cv} \frac{dm_{dry,cv}}{dt} + m_{w,cv} \frac{du_{w,cv}}{dt} + u_{w,cv} \frac{dm_{w,cv}}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt} h_g \quad (21)$$

จากสมการที่ 21 เมื่อชีวมวลแห้งในปริมาตรควบคุม ($m_{dry,cv}$) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = m_{dry,cv} \frac{du_{dry,cv}}{dt} + m_{w,cv} \frac{du_{w,cv}}{dt} + u_{w,cv} \frac{dm_{w,cv}}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt} h_g \quad (22)$$

เมื่อพลังงานภายในของชีวมวลแห้งในปริมาตรควบคุม ($u_{dry,cv}$) เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยความร้อนสัมผัส (Sensible heat) คืออุณหภูมิของชีวมวลแห้งเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยไม่เปลี่ยนแปลงสถานะ

ฉะนั้น $u_{dry,cv} = c_{dry,cv}T_{dry,cv}$ เมื่อ $c_{dry,cv}$ และ $T_{dry,cv}$ คือค่าความจุความร้อนและอุณหภูมิของชีวมวลแห้ง ตามลำดับ โดย $c_{dry,cv}$ เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างน้อยมาก ถือว่าเป็นค่าคงที่และ $u_{w,cv} = c_{w,cv}T_{w,cv}$ เนื่องจากพลังงานภายในของมวลน้ำในปริมาตรควบคุมในส่วนนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยความร้อนสัมผัสและในขณะเดียวกันมวลน้ำอีกส่วนหนึ่งที่อยู่ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงของมวลน้ำเทียบกับเวลานั้น ($u_{w,cv}\frac{dm_{w,cv}}{dt}$) ในช่วงอุณหภูมินี้มวลน้ำในปริมาตรควบคุมอยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid) คือมวลน้ำนี้ยังไม่เปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นไอ แต่พร้อมที่จะรอการเปลี่ยนสถานะ ฉะนั้น พลังงานภายในของมวลน้ำเท่ากับพลังงานภายในของมวลน้ำในสถานะของเหลวอิ่มตัว นั่นคือ $u_{w,cv} = u_f$ จัดรูปแบบสมการที่ 6 ใหม่ จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = m_{dry,cv}c_{dry,cv}\frac{dT_{dry,cv}}{dt} + m_{w,cv}c_{w,cv}\frac{dT_{w,cv}}{dt} + u_{w,cv}\frac{dm_{w,cv}}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt}h_g \tag{23}$$

$$5\dot{Q}_{T/S} = m_{dry,cv}c_{dry,cv}\frac{dT_{dry,cv}}{dt} + m_{w,cv}c_{w,cv}\frac{dT_{w,cv}}{dt} + u_{f}\frac{dm_{w,cv}}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt}h_g \tag{24}$$

จากสมการที่ 8 ในระยะนี้อุณหภูมิของชีวมวลแห้งและอุณหภูมิของน้ำในปริมาตรควบคุมเทียบกับเวลามีค่าเท่ากัน เนื่องจากเป็นชีวมวลชนิดเดียวกัน ฉะนั้น $\frac{dT_{dry,cv}}{dt} = \frac{dT_{w,cv}}{dt} = \frac{dT_{raw}}{dt}$ จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(m_{dry,cv}c_{dry,cv} + m_{w,cv}c_{w,cv}\right)\frac{dT_{raw}}{dt} + u_{f}\frac{dm_{w,cv}}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt}h_g \tag{25}$$

พิจารณาพจน์มวลน้ำในปริมาตรควบคุมที่เวลาใดๆ ($\frac{dm_{w,cv}}{dt}$) จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ที่พิจารณาสมดุลมวลและปริมาตรควบคุม (Conservation of mass and the control volume) จากกฎของสมดุลมวลรูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพสมดุลมวลของมวลน้ำในชีวมวล เมื่อมวลของน้ำเริ่มต้นในปริมาตรควบคุม ($m_{w,cv,i}$) เท่ากับมวลของน้ำในปริมาตรควบคุมที่เวลาใดๆ ($m_{w,cv,t}$) บวกกับมวลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ ($m_{w,g}$) สามารถเขียนได้ว่า $m_{w,cv,i} = m_{w,cv,t} + m_{w,g}$

(a) ที่เวลาเริ่มต้น (b) ที่เวลาใดๆ

รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพสมดุลมวลของมวลน้ำในชีวมวล

หาอนุพันธ์ของสมการข้างบนเทียบกับเวลาจะได้

$$\frac{dm_{w,cv,i}}{dt} = \frac{dm_{w,cv,t}}{dt} + \frac{dm_{w,g}}{dt}$$

$$-\frac{dm_{w,g}}{dt} = \frac{dm_{w,cv,t}}{dt}$$

เมื่อมวลของน้ำในปริมาตรควบคุมที่เวลาใดๆคือมวลของน้ำในปริมาตรควบคุม สามารถแทนค่าลงในสมการที่ 25 จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(m_{dry,cv}c_{dry,cv} + m_{w,cv}c_{w,cv}\right)\frac{dT_{raw}}{dt} + \left(h_g - u_f\right)\frac{dm_{w,g}}{dt} \quad (26)$$

พิจารณาพจน์ของน้ำที่ระเหยออกจากปริมาตรควบคุมที่เวลาใดๆ ($\frac{dm_{w,g}}{dt}$) จากสมการ Page [38]

$$MR = e^{-kt^n} \quad (27)$$

เมื่อ MR คือ สัดส่วนของปริมาณความชื้นของชีวมวลที่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 27 ดังนี้

$$MR = \frac{m_{w,g} - m_e}{m_{w,g,i} - m_e}$$

เมื่อ $m_{w,g}$ คือปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆเทียบกับชีวมวลแห้ง

$m_{w,g,i}$ คือปริมาณความชื้นเริ่มต้นเทียบกับชีวมวลแห้ง

m_e คือปริมาณความชื้นสมดุลเทียบกับชีวมวลแห้ง

เมื่อปริมาณความชื้นสมดุล

เมื่อ

t คือเวลาระบบหรือเวลาเริ่มต้นในระยะทำระเหย (ระยะที่ 2) (วินาที)

t' คือเวลาเริ่มต้นในระยะทำระเหยหรือเวลาที่นับจากจุดสุดท้ายของระยะให้ความร้อน (วินาที)

จากสมการที่ (27) แทนค่าลงในสมการนี้จะได้

$$\frac{\left(\frac{m_{w,g}}{m_{dry,cv}}-\frac{m_e}{m_{dry,cv}}\right)}{\left(\frac{m_{w,g,i}}{m_{dry,cv}}-\frac{m_e}{m_{dry,cv}}\right)}=e^{-k(t-t')^n} \tag{28}$$

จากสมการที่ 28 ในทางพีชคณิตสามารถตัดพจน์ของ $m_{dry,cv}$ ได้ เนื่องจากเป็นพจน์เดียวกัน จะได้

$$\frac{\left(\frac{m_{w,g}-m_e}{m_{dry,cv}}\right)}{\left(\frac{m_{w,g,i}-m_e}{m_{dry,cv}}\right)}=e^{-k(t-t')^n} \tag{29}$$

$$\frac{m_{w,g}-m_e}{m_{w,g,i}-m_e}=e^{-k(t-t')^n} \tag{30}$$

$$m_{w,g}-m_e=\left(m_{w,g,i}-m_e\right)\left(e^{-k(t-t')^n}\right) \tag{31}$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ 31 เทียบกับเวลา จะได้

$$\frac{dm_{w,g}}{dt}=\left(m_{w,g,i}-m_e\right)\frac{d\left(e^{-k(t-t')^n}\right)}{dt} \tag{32}$$

จากสมการที่ 32 จะได้

$$\frac{dm_{w,g}}{dt}=\left(m_{w,g,i}-m_e\right)\left(-kne^{-k(t-t')^n}\left(t-t'\right)^{n-1}\right) \tag{33}$$

แทนค่าสมการที่ (33) ลงในสมการที่ (26) จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(m_{dry,cv}c_{dry,cv} + m_{w,cv}c_{w,cv}\right)\frac{dT_{raw}}{dt} + \left(h_g - u_f\right)\left(\left(m_{w,g,i} - m_e\right)\left(-kne^{-k(t-t')^n}\left(t-t'\right)^{n-1}\right)\right) \quad (34)$$

หรือ

$$\frac{dT_{raw}}{dt} = \frac{5\dot{Q}_{T/S} - \left(\left(h_g - u_f\right)\left(\left(m_{w,g,i} - m_e\right)\left(\left(-kne^{-k(t-t')^n}\left(t-t'\right)^{n-1}\right)\right)\right)\right)}{\left(m_{dry,cv}c_{dry,cv} + m_{w,cv}c_{w,cv}\right)} \quad (35)$$

จากสมการที่ 35 ต้องการจัดรูป $m_{dry,cv}$, $m_{w,cv}$, $m_{w,g,i}$ และ m_e ให้อยู่ในรูปความชื้นแบบเปียก เพื่อให้ง่ายต่อการป้อนค่าในโปรแกรม Matlab สามารถทำได้ดังนี้

จากนิยามปริมาณความชื้นแบบเปียกคือสัดส่วนระหว่างมวลของน้ำกับมวลรวมของชีวมวล ดังสมการที่ 36

$$X_{wb} = \frac{m_{w,cv}}{m_{raw,cv}}x100 \quad (36)$$

เมื่อ $m_{raw,cv}$ คือมวลรวมของชีวมวล

เมื่อ $m_{w,cv} = m_{raw,cv} - m_{dry,cv}$ และในที่นี่มีค่าเท่ากับมวลของน้ำเริ่มต้นที่ระเหยกลายเป็นไอ ($m_{w,g,i}$) และมวลของน้ำสมดุล (m_e) ด้วย แทนค่าลงสมการที่ 36 จะได้

$$X_{wb} = \frac{m_{raw,cv} - m_{dry,cv}}{m_{raw,cv}}x100 \quad (37)$$

จัดรูปแบบสมการที่ 37 ให้สมการอยู่ในรูปของ $m_{dry,cv}$ จะได้

$$m_{dry,cv} = m_{raw,cv} - \left(\frac{X_{wb}m_{raw}}{100}\right) \quad (38)$$

$$m_{dry,cv} = m_{raw,cv}\left(1 - \frac{X_{wb}}{100}\right) \quad (39)$$

จากสมการที่ 36 สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปมวลของน้ำในปริมาตรควบคุมได้ ดังนี้

$$m_{w,cv} = \frac{X_{wb} m_{raw,cv}}{100} \tag{40}$$

แทนค่าสมการที่ 39 และ 40 ลงในสมการที่ 34 จะได้

$$5\dot{Q}_{T/S} = \left(\left(m_{raw,cv}\left(1-\frac{X_{wb}}{100}\right)\right)c_{dry,cv} + \left(\frac{X_{wb} m_{raw,cv}}{100}\right)c_{w,cv}\right)\frac{dT_{raw}}{dt} + \left(h_g - u_f\right)\left(\left(\frac{X_{wb} m_{raw,cv}}{100} - \frac{X_{wb,e} m_{raw,cv}}{100}\right)\left(-kne^{-k(t-t')^n}\left(t-t'\right)^{n-1}\right)\right) \tag{41}$$

หรือ

$$\frac{dT_{raw}}{dt} = \frac{5\dot{Q}_{T/S} - \left(\left(h_g - u_f\right)\left(\left(\frac{X_{wb} m_{raw,cv}}{100} - \frac{X_{wb,e} m_{raw,cv}}{100}\right)\left(-kne^{-k(t-t')^n}\left(t-t'\right)^{n-1}\right)\right)\right)}{\left(\left(m_{raw,cv}\left(1-\frac{X_{wb}}{100}\right)\right)c_{dry,cv} + \left(\frac{X_{wb} m_{raw,cv}}{100}\right)c_{w,cv}\right)} \tag{42}$$

และความร้อนจากท่อชนิดเทอร์โมไซฟอน $\left(\dot{Q}_{T/S}\right)$

คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{T/S} = \frac{\Delta T}{z_{total}} \tag{43}$$

โดย z_{total} คือ ความต้านทานความร้อน (K/W)

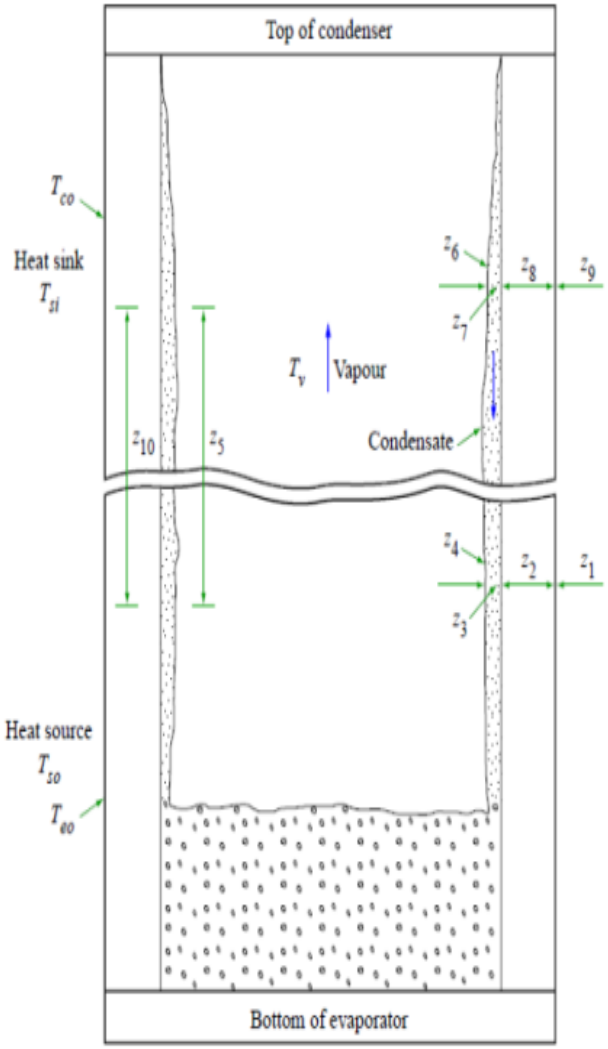
ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนและอุณหภูมิของชีวมวล (K) นั่นคือ $\Delta T = T_{so} - T_{Bio} - \Delta T_h$

โดย T_{so} คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อน (K)

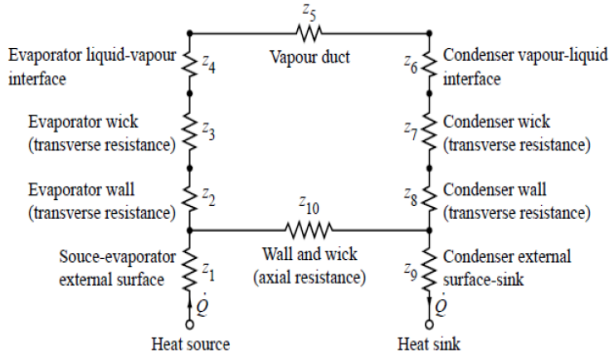
T_{Bio} คือ อุณหภูมิของชีวมวล (K)

ΔT_h คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่แตกต่างกันของสารทำงานอันเนื่องมาจากความดันสถิตย์ (K)

ในที่นี้ z_{total} หาได้จากความต้านทานรวมของท่อเทอร์โมไซฟอน จากรูปที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 แสดงความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน

เมื่อ $$z_{total} = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8 + z_9 + z_{10} \quad (44)$$

โดย z_1 คือ ความต้านทานความร้อนจากแหล่งความร้อนมาสู่ผิวผนังท่อส่วนทำระเหย (K/W)

โดย z_9 คือ ความต้านทานความร้อนจากผิวผนังท่อส่วนควบแน่นไปสู่ชีวมวล (K/W)

$$z_9 = \frac{\log(L_0 / L)}{2\tau l_c k_{bio}} \quad (45)$$

เมื่อ L_0, L คือความหนาของชีวมวลในห้องทอรีไฟร์ภายในและภายนอก ตามลำดับ (m)

k_{bio} คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชีวมวล (W/mK) สามารถคำนวณได้จาก

$$k_{bio} = \frac{k_s\left[2k_s + k_{air} - 2\varepsilon(k_s - k_{air})\right]}{2k_s + k_{air} + \varepsilon(k_s - k_{air})}$$ [, #170]

k_s คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชีวมวลแห้ง (W/mK) สามารถคำนวณได้จาก $k_s = 0.13 + (0.003T_{Bio})$

ε คือค่าคงที่ 0.01

k_{air} คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0395 (W/mK)

โดย z_2 คือความต้านทานความร้อนภายในผนังท่อในส่วนทำระเหย (K/W)

$$z_2 = \frac{\ln(D_0 / D)}{2\pi l_e \lambda_x} \quad (46)$$

เมื่อ D_0, D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในตามลำดับ (m)

l_e คือความยาวของท่อเทอร์โมไซฟอนส่วนทำระเหย (m)

λ_x คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน (W/mK)

โดย z_8 คือ ความต้านทานความร้อนภายในผนังท่อในส่วนควบแน่น (K/W)

$$z_8 = \frac{\ln\left(D_0 / D\right)}{2\pi l_c \lambda_x} \tag{47}$$

โดย z_{3f} คือ ความต้านทานความร้อนภายใน Film ของท่อส่วนทำระเหย (K/W)

$$Z_{3f} = \frac{C\dot{Q}^{1/3}}{D^{4/3} g^{1/3} l_e \phi_2{}^{4/3}} \tag{48}$$

เมื่อ C คือ 0.235

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (*m*)

g คือ 9.81

$$\phi_2 = \frac{\left(L\lambda_l{}^3 \rho_l{}^2\right)^{1/4}}{\mu_l}$$

โดย z_{3p} คือ ความต้านทานเชิงความร้อนของจุดเดือด (K/W)

$$Z_{3p} = \frac{1}{\phi_3 g^{0.2} \dot{Q}^{0.4} \left(\pi D l_e\right)^{0.6}} \tag{49}$$

เมื่อ $\phi_3 = 63\left(p_v / p_a\right)^{0.23}$

โดย z_7 คือ ความต้านทานเชิงความร้อนของ Film ของ Condensate (K/W)

$$Z_7 = \frac{C\dot{Q}^{1/3}}{D^{4/3} g^{1/3} l_c \phi_2{}^{4/3}} \tag{50}$$

Z_4 และ Z_6 คือ ความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างไอกับของเหลวในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ ซึ่งละทิ้งได้เนื่องจากมีค่าน้อยมาก (K/W)

Z_5 คือ ค่าความต้านทานความร้อนประสิทธิผลเนื่องจากความดันตกของไอที่ไหลจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น

Z_{10} คือ ความต้านทานความร้อนตามแนวแกนของผนังท่อ ในที่นี้สมมติว่าไม่เกิดขึ้น

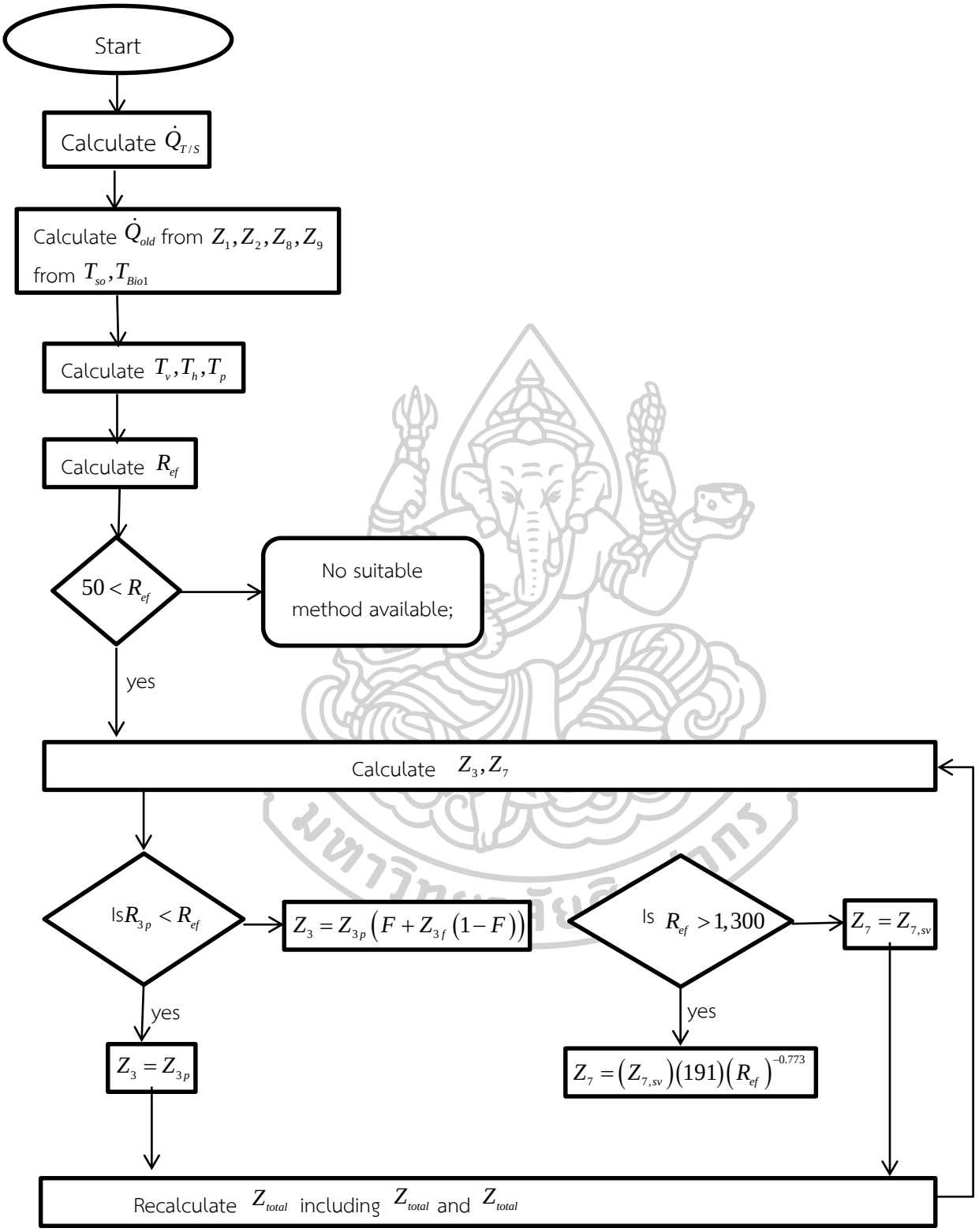
เมื่อ $z_{total} = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7 + z_8 + z_9 + z_{10}$ (44)

เพราะฉะนั้น นำค่า Z_1 ถึง Z_{10} แทนลงในสมการที่ 44 จะได้ค่าความต้านทานทั้งหมด จากนั้น นำลงในแทนค่าในสมการที่ 17 และ 42 ต่อไป เพื่อดำเนินการคำนวณแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Matlab 2014 เพื่อจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนและคำนวณอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล

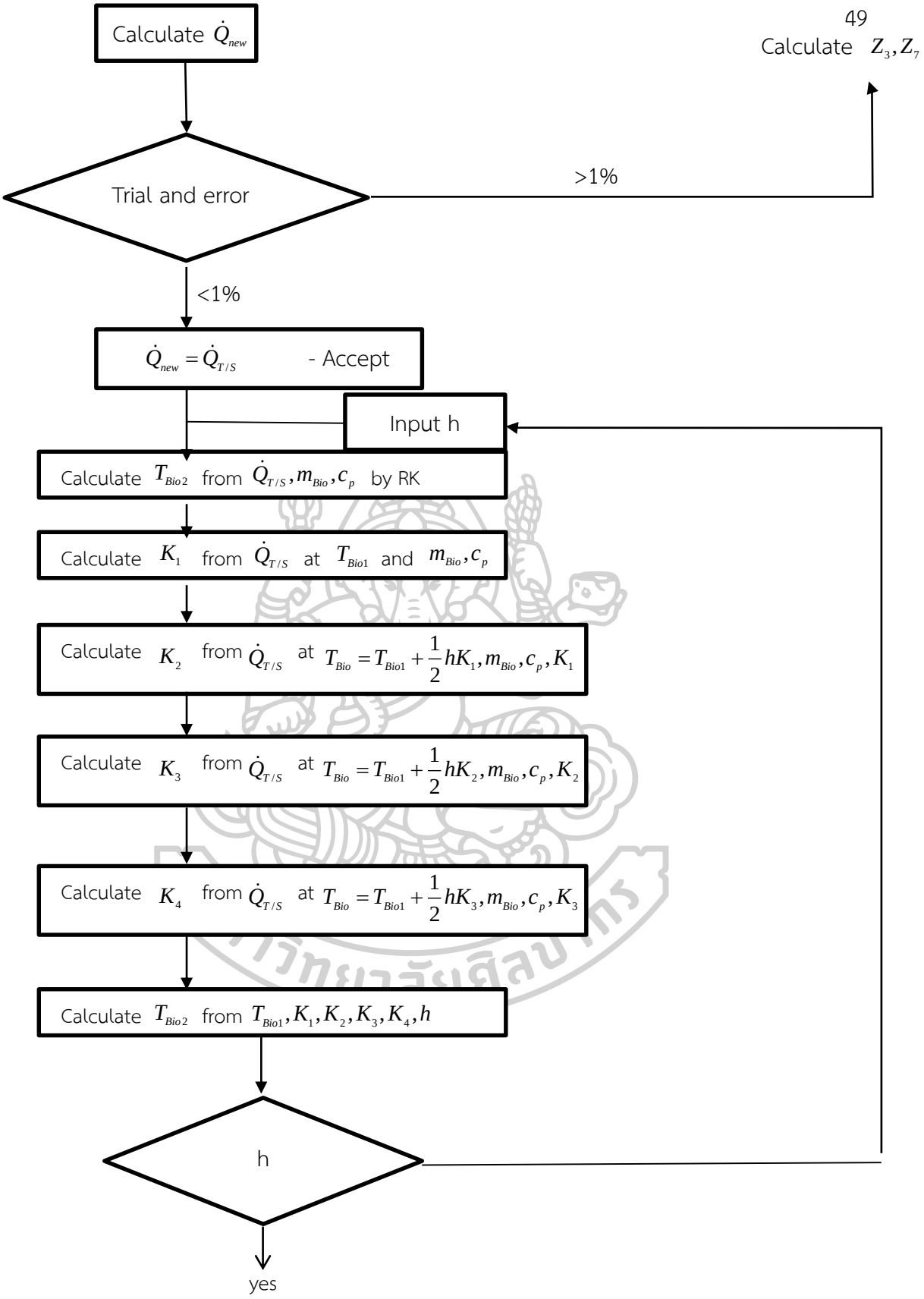
3.3.1.3 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab 2014

สำหรับการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab 2014สามารถเริ่มสร้างได้ด้วยการเขียนแผนภาพลำดับให้สอดคลองกับการเขียนโปรแกรมเพื่อง่ายต่อ ความเข้าใจ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.11 และ 3.12 ดังนี้

จากรูปที่ 3.11 และ 3.12 แสดงขั้นตอนการคำนวณอัตราการให้ความร้อนโดยใช้โปรแกรม Matlab เริ่มต้นโดยการคำนวณอัตราการให้ความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ($\dot{Q}_{T/S}$) จากฟังก์ชันของความต้านทานเชิงความร้อนตามสมการของ Z_1, Z_2, Z_8, Z_9 ตามลำดับและกำหนดอุณหภูมิของแหล่งความร้อน (T_{SO}) อุณหภูมิชีวมวล (T_{bio}) โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นเมื่อวินาทีที่ 0 ส่งผลให้อุณหภูมิชีวมวลเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องในที่นี่ กำหนด 307.15 K ค่าที่ได้จะ $\dot{Q}_{old}$ ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณ T_v, T_h, T_p และ R_{ef} ถ้ามากกว่า 50 เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้และนำไปคำนวณ Z_3 และ Z_7 ต่อไป สำหรับ Z_3 ถ้าคำนวณ Z_{3p} มีค่าน้อยกว่า R_{ef} ในกรณีนี้ Z_3 มีค่าเท่ากับ Z_{3p} แต่ถ้าไม่ใช่ในกรณีนี้ Z_3 สามารถคำนวณได้จาก $Z_3 = Z_{3p}\left(F + Z_{3f}\left(1-F\right)\right)$ สำหรับ Z_7 ถ้า R_{ef} มากกว่า 1,300 ในกรณีนี้ Z_7 สามารถคำนวณได้จาก $Z_7 = \left(Z_{7,sv}\right)\left(191\right)\left(R_{ef}\right)^{-0.773}$ แต่ถ้าไม่ใช่ Z_7 จะมีค่าเท่ากับ $Z_{7,sv}$ จากกระบวนการการคำนวณด้วยชุดคำนวณนี้จะสามารถทำให้ทราบค่าของค่าความต้านทานทั้งหมดหรือ Z_{total} ซึ่งจะเป็นความต้านทานทั้งหมดในกรณีแรก จากนั้น ต้องทำการคำนวณค่าความผิดพลาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในทางวิศวกรรมได้กำหนดค่าความผิดพลาดนี้ไม่เกิน 1 % โดยจะทำการคำนวณค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนหรือ $\dot{Q}_{new}$ อีกครั้ง



รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการคำนวณอัตราการให้ความร้อน

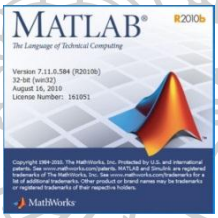


รูปที่ 3.12 แสดงแสดงขั้นตอนการคำนวณอัตราการให้ความร้อน (ต่อ)

ถ้าค่าความผิดพลาดนี้ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์จะมีผลให้อัตราการส่งผ่านความร้อนก็คือค่าที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณ แต่ถ้าไม่ใช่จะต้องนำ $\dot{Q}_{new}$ ไปคำนวณค่า Z_3 และ Z_7 อีกครั้ง

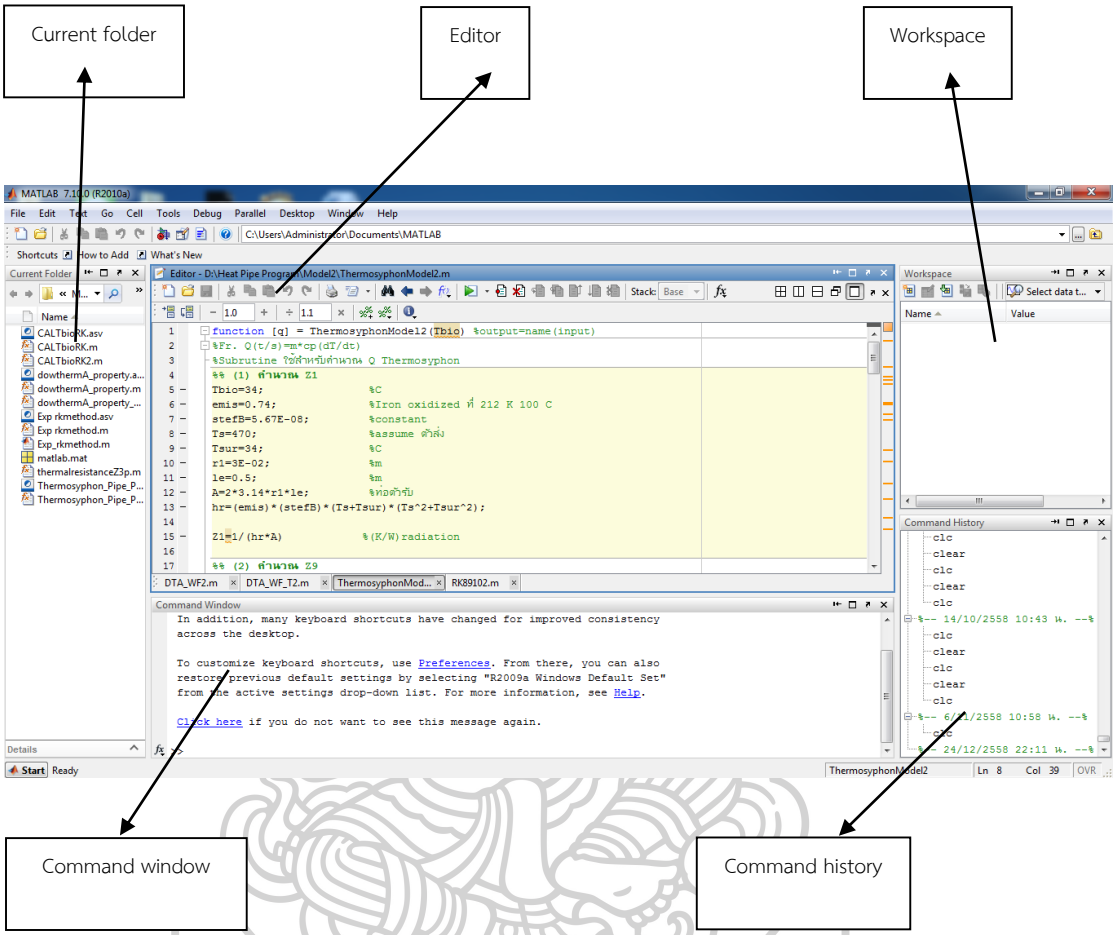
จากนั้นนำค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนที่ได้ไปคำนวณอุณหภูมิชีวมวลในเวลาถัดไป จะดำเนินการคำนวณโดยการใช้วิธีการคำนวณแบบรุงเงคุตตาอันดับที่สี่ กำหนดขั้นของเวลา (h) ซึ่งสามารถคำนวณ K_1, K_2, K_3 และ K_4 ได้ตามสมการในรูปที่ 3.11 จะสามารถคำนวณอุณหภูมิถัดไปที่เวลาต่อไปและสามารถใช้วิธีการนี้เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิถัดไปได้

รูปที่ 3.13 แสดงไอคอนของโปรแกรม Matlab 2014 บนหน้า Desktop และ รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Matlab 2014



รูปที่ 3.13 แสดงไอคอนของโปรแกรม Matlab 2014 บนหน้า Desktop

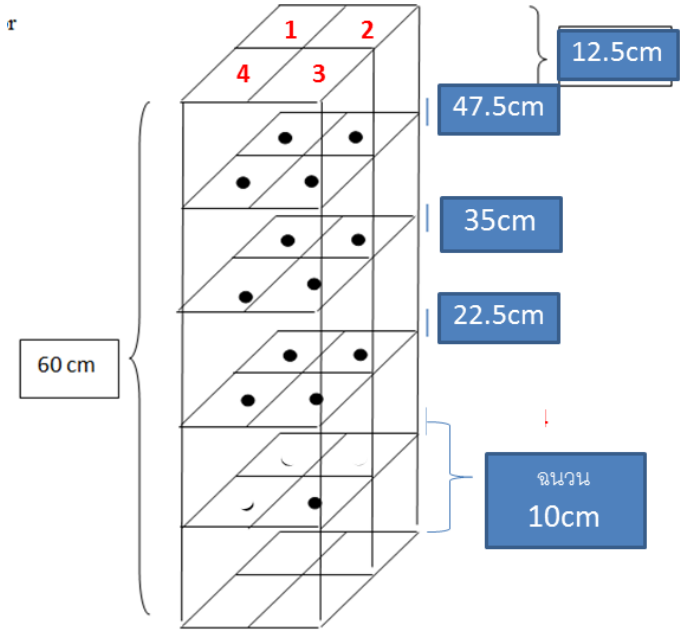
เมื่อเปิดการใช้งานจะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรม ในที่นี่ จะระบุหมายของหน้าต่างย่อยที่สำคัญ ซึ่งจะได้รับการอธิบายต่อไป โปรแกรม Matlab 2014 (Matrix laboratory) คือภาษาคอมพิวเตอร์ชั้นสูง สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพสูง อยู่บนพื้นฐานของการคำนวณทางเมตริกซ์ (Matrix manipulation and computation) ใน Matlab เราสามารถสร้างและกำหนดค่าตัวแปรได้ทันที โดยไม่ต้องประกาศตัวแปรก่อน ข้อมูลที่เป็นตัวเลขและตัวอักษร (Strings) สามารถถูกจัดเก็บในรูปแบบของแถวและหลักหรือ Array ซึ่งก็คือ Matrix นั่นเอง เมื่อเริ่มต้นสตาร์ทโปรแกรม Matlab จะทำการเปิดหน้าต่าง (Window) ขึ้นมา ซึ่งหน้าต่างนี้จะใช้เป็นตัวติดต่อสื่อสารหรือ GUI (Graphic User Interface) สำหรับ Matlab อาจจะเห็นหน้าต่างย่อยหลายหน้าต่าง ซึ่งแสดงหน้าต่างย่อยหลักคือ Current folder, Editor, Command window, Workspace และ Command history ตามลำดับ เมื่อตัวโปรแกรม Matlab พร้อมรับคำสั่งจากผู้ใช้ หน้าต่าง Editor และ Command window จะเป็นหน้าต่างที่ถูกใช้มากที่สุดและเป็นส่วนสำคัญสำหรับการเขียนโปรแกรม



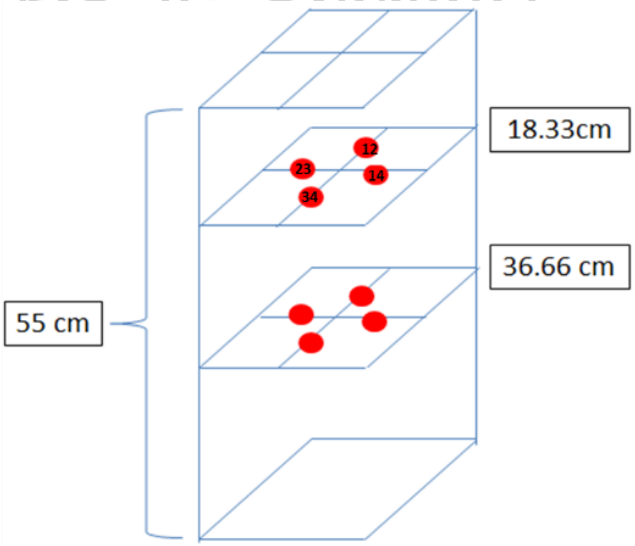
รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Matlab 2014

3.4 วิธีการทดลอง

ชีวมวลดิบคือฟางข้าวและซังข้าวโพดที่ผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องสับหยาบและเครื่องสับละเอียด ผ่านตะแกรงขนาด 5 มิลลิเมตร พร้อมทั้งผ่านการควบคุมความชื้นให้มีปริมาณไม่เกิน 10% โดยมวล ตามมาตรฐาน ASTM จำนวน 2.4 กิโลกรัมสำหรับฟางข้าวและ 4.5 กิโลกรัมสำหรับซังข้าวโพด แล้วนำมาใส่ลงในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น ซึ่งภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนนี้ ได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคับเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 ดังนี้



รูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคับเปิลภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น



รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคับเปิลภายในห้องให้ความร้อน

จากรูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคับเปิลต่างๆ ภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น โดยมีจุดประสงค์เพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิในแนวระนาบที่ระยะช่องว่างเท่าๆกัน โดยในหนึ่งระนาบจะ

ติดตั้งเทอร์โมคับเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิชีวมวล 4 ตำแหน่งและวัดอุณหภูมิผนังท่อเทอร์โมไซฟอน 5 ตำแหน่งรวมทั้งสิ้น 31 ตำแหน่ง รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคับเปิลที่ตำแหน่งต่างๆในห้องให้ความร้อน เพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิในแนวระนาบที่ระยะช่องว่างเท่าๆกัน โดยในหนึ่งระนาบจะติดตั้งเทอร์โมคับเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศร้อน 4 ตำแหน่งและวัดอุณหภูมิผนังท่อเทอร์โมไซฟอน 5 ตำแหน่ง รวมทั้งสิ้น 29 ตำแหน่ง จากนั้น ปิดฝาและนำอะลูมิเนียมเทปแปะเพื่อปิดตามแนวรอยต่อต่างๆเพื่อป้องกันอากาศเล็ดลอดเข้ามาในเตาปฏิกรณ์ จากนั้น เปิดวาล์วเพื่อไล่น้ำและสารระเหยออก ดำเนินการให้ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม จะถ่ายเทความร้อนจากห้องให้ความร้อนไปสู่ท่อเทอร์โมไซฟอนซึ่งเป็นส่วนทำระเหยขึ้นไปสู่ห้องทอรีแฟคชั่นซึ่งเป็นส่วนควบแน่น ให้ความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิอากาศของห้องให้ความร้อนที่ 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ ในการควบคุมอากาศร้อนให้คงที่ทำได้โดยการรี่ไฟที่เป็นแหล่งให้ความร้อน เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนยาวนานขึ้นจะเป็นผลทำให้อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการสะสมความร้อนภายในห้องให้ความร้อนนั่นเอง จนกระทั่งอุณหภูมิของชีวมวลในห้องทอรีแฟคชั่นไปถึงอุณหภูมิเป้าหมายคือ 493.15 K จากนั้น จะควบคุมอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นให้คงที่ต่อไป ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นนี้จะเข้าสู่กระบวนการทำเย็นตามอุณหภูมิห้อง โดยพลิกเตาปฏิกรณ์ทุกๆครึ่งชั่วโมงเพื่อให้เกิดการคายความร้อนของชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่น โดยการกระจายอุณหภูมิของท่อเทอร์โมไซฟอนและพฤติกรรมของอุณหภูมิทั้งหมดจะถูกบันทึกด้วยเครื่องดาต้าล้อคเกอร์ (Data logger)

หลังจากทำการทดลองแล้วจะได้ข้อมูลของการกระจายอุณหภูมิที่ทำการบันทึกด้วยดาต้าล็อคเกอร์และผลิตภัณฑ์ทอรีไฟร์ สำหรับข้อมูลอุณหภูมิและเวลาจากดาต้าล็อคเกอร์สามารถนำมาคำนวณอัตราการให้ความร้อน และศึกษาลักษณะความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนสำหรับผลิตภัณฑ์ทอรีไฟร์สามารถนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ทอรีไฟร์ต่อไปได้

3.5 วัตถุดิบและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้วัตถุดิบและเครื่องมือสำหรับการวิจัย ดังนี้

3.5.1 ชีวมวลดิบ คือ ฟางข้าวและซังข้าวโพด

3.5.2 เครื่องมือสำหรับการวิจัย

3.5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล

3.5.2.1.1 เครื่องสับหยาบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดขนาดของชีวมวลดิบจากแหล่งวัตถุดิบซึ่งอาจจะมีขนาดใหญ่ถึงใหญ่มากให้มีขนาดเล็กลง โดยชีวมวลที่ผ่านเครื่องสับหยาบจะมีขนาดในช่วง 1 – 5 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.17

รูปที่ 3.17 แสดงเครื่องสับหยาบ

3.5.2.1.2 เครื่องสับละเอียดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมชีวมวลดิบที่ผ่านกระบวนการการสับหยาบแล้ว ให้มีขนาดเล็กลง โดยผ่านตะแกรงที่ใช้คัดขนาดภายในเครื่องสับละเอียดมีขนาด 5 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.18

รูปที่ 3.18 แสดงเครื่องสับละเอียด

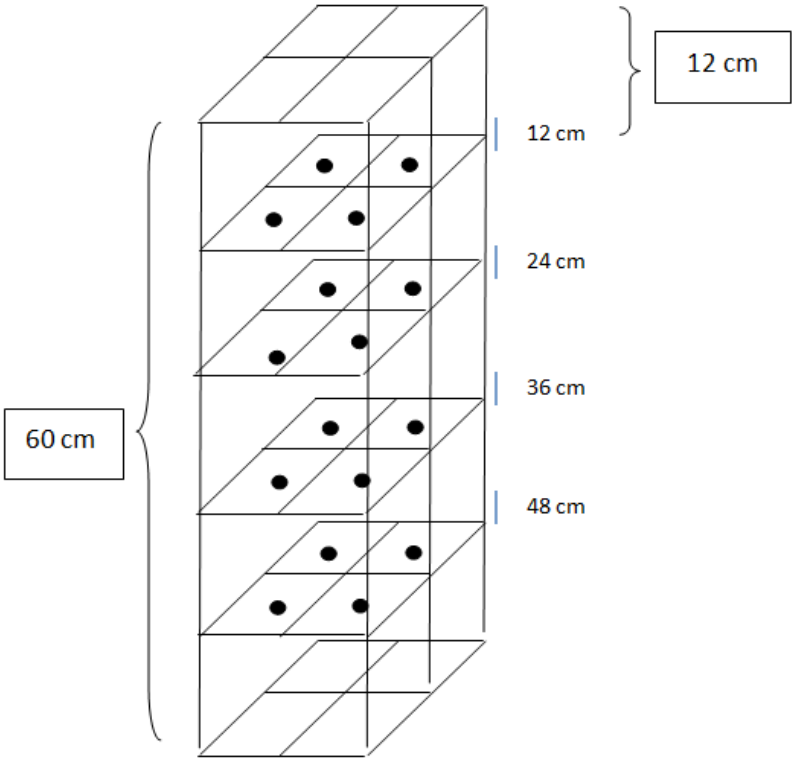
3.5.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

3.5.2.2.1 เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

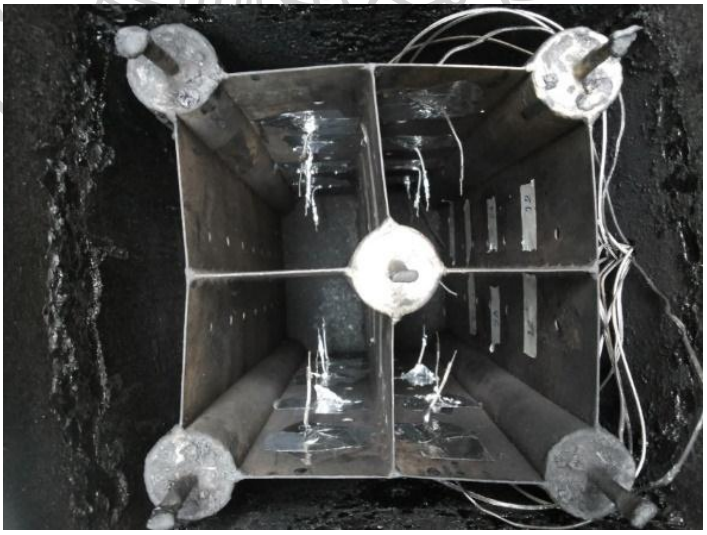
ตามรูปที่ 3.19 แสดงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นเตาปฏิกรณ์ที่พัฒนามาจากเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดนิ่งในระดับห้องปฏิบัติการมาเป็นเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ประกอบด้วยท่อเทอร์โมไซฟอน มีขนาดกว้าง 37 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร และสูง 150 เซนติเมตร ประกอบด้วยท่อเทอร์โมไซฟอน แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ห้องทอรีแฟคชั่นสูง 65 เซนติเมตร และห้องให้ความร้อนสูง 85 เซนติเมตร โดยมีท่อเทอร์เทอร์โมไซฟอนจำนวน 5 ท่อ ทำจากท่อเหล็กกลมมีตะเข็บที่ทำหน้าที่ในการกระจายอุณหภูมิให้สม่ำเสมอทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์มีความยาว

110 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 เซนติเมตร แบ่งเป็นส่วนควบแน่นที่มีความยาว 60 เซนติเมตรวัดจากด้านบนของท่อและส่วนทำระเหย 50 เซนติเมตรในส่วนที่เหลือ ภายในบรรจุสารทำงาน Downtherm A ที่มีปริมาตร 50 % ของส่วนทำระเหย โดยมีแหล่งให้ความร้อนคือก๊าซหุงต้ม (LPG)

รูปที่ 3.19 แสดงเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 3.20 แสดงแผนภาพตำแหน่งของการติดตั้งสายเทอร์โมคัฟเปิล ชนิดเค เพื่อวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้วทั้งเตาปฏิกรณ์



รูปที่ 3.21 แสดงการติดตั้งสายเทอร์โมคัฟเปิล ชนิดเค ภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

จากรูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงตำแหน่งของการติดตั้งสายเทอร์โมคัฟเปิล ชนิดเค เพื่อวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์และรูปที่ 3.20 แสดงการติดตั้งสายเทอร์โมคัฟเปิล ชนิดเค เพื่อวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิทั่วทั้งเตาปฏิกรณ์และรูปที่ 3.21 แสดงการติดตั้งสายเทอร์โมคัฟเปิล ชนิดเค ภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนแบ่งเป็น 2 ส่วนคือวัดอุณหภูมิของชีวมวลในห้องทอรีแฟคชั่นและวัดอุณหภูมิผิวท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย สำหรับตำแหน่งการติดตั้งสายเทอร์โมคับเปิลในห้องทอรีแฟคชั่นจะติดตั้งทั้งหมด 27 ตำแหน่ง เพื่อวัดอุณหภูมิในแนวระนาบและแนวดิ่งและสำหรับตำแหน่งการติดตั้งสายเทอร์โมคับเปิลในห้องให้ความร้อนจะติดตั้งที่ตำแหน่งกลางของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนส่วนทำระเหยที่ระยะ 25 เซนติเมตรจากส่วนล่างสุด ซึ่งอุณหภูมิทั้งหมดจะแสดงผลที่เครื่องดาต้าล็อคเกอร์ (Data logger GL220 GRAPHTEC) ที่มีความแม่นยำของการวัดในช่วง –1 ถึง +1 K

3.5.2.2.2 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ (Temperature measurement)

เพื่อวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นซึ่ง ได้แก่ ห้องทอรีแฟคชั่นและห้องให้ความร้อน จะใช้สายเทอร์โมคับเปิลชนิดเคที่มีส่วนผสมของโครเมล / อะลูเมล ย่านอุณหภูมิใช้งานในช่วง -543.15 ถึง 1645.15 K แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ -6.458 ถึง 54.875 มีความแม่นยำ 275.35 K และอุณหภูมิจะแสดงผลและบันทึกด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ Data logger ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น midi LOGGER GL220 ค่า ERROR 0.1 ĸ ดังแสดงในรูปที่ 3.22

รูปที่ 3.22 แสดงเครื่อง Data logger ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น midi LOGGER GL220

3.5.2.2.3 แหล่งให้ความร้อน (Heat souce)

สำหรับแหล่งให้ความร้อนจะใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) ซึ่งวางไว้ด้านล่างสุดของเตา ซึ่งทำหน้าที่ในการให้ความร้อนในส่วนห้องให้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.23

รูปที่ 3.23 แสดงก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG (Liquefied Petroleum Gas)

3.5.2.2.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก

สำหรับการตรวจวัดน้ำหนักของชีวมวลก่อนและหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชั่น จะได้รับการชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล รุ่น APTP- 452 ชั่งน้ำหนักวัตถุที่ไม่เกิน 1,000 กรัม / 0.01 กรัม

3.6 ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มการทดลองเก็บข้อมูลสำหรับการวิจัยตั้งแต่เดือนมกราคม 2558 ถึงเดือนมีนาคม 2560 และการสรุปผลการทดลองพร้อมเขียนรายงานการวิจัยจะแล้วเสร็จภายในเดือนมกราคม 2561 ซึ่งการดำเนินการตลอดระยะเวลาการวิจัยสามารถเขียนเป็นตารางสรุป

ตารางที่ 3.5 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย

รายการการดำเนินการวิจัย	ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเพื่อหาเงื่อนไขและหลักการทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน	ต.ค. 2556
2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเพื่อหาเงื่อนไขสำหรับการสร้างแบบจำลองของการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน	ต.ค. 2556
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนทั้ง 2 ระยะ คือ ระยะอุ่นร้อนและระยะไล่น้ำ	พ.ย. 2557
4. ดำเนินการทดลองตามเงื่อนไขข้างต้นกับเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน	ม.ค. 2558 – ม.ค. 2560
5. เปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองกับผลการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง	ก.พ. 2560 – มิ.ย. 2560
6. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยแบบจำลอง	ก.ค. 2560 – ก.ย. 2560
7. สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน พร้อมเขียนรายงานสรุปการวิจัย	ต.ค. 2560 – ม.ค. 2561

3.7 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

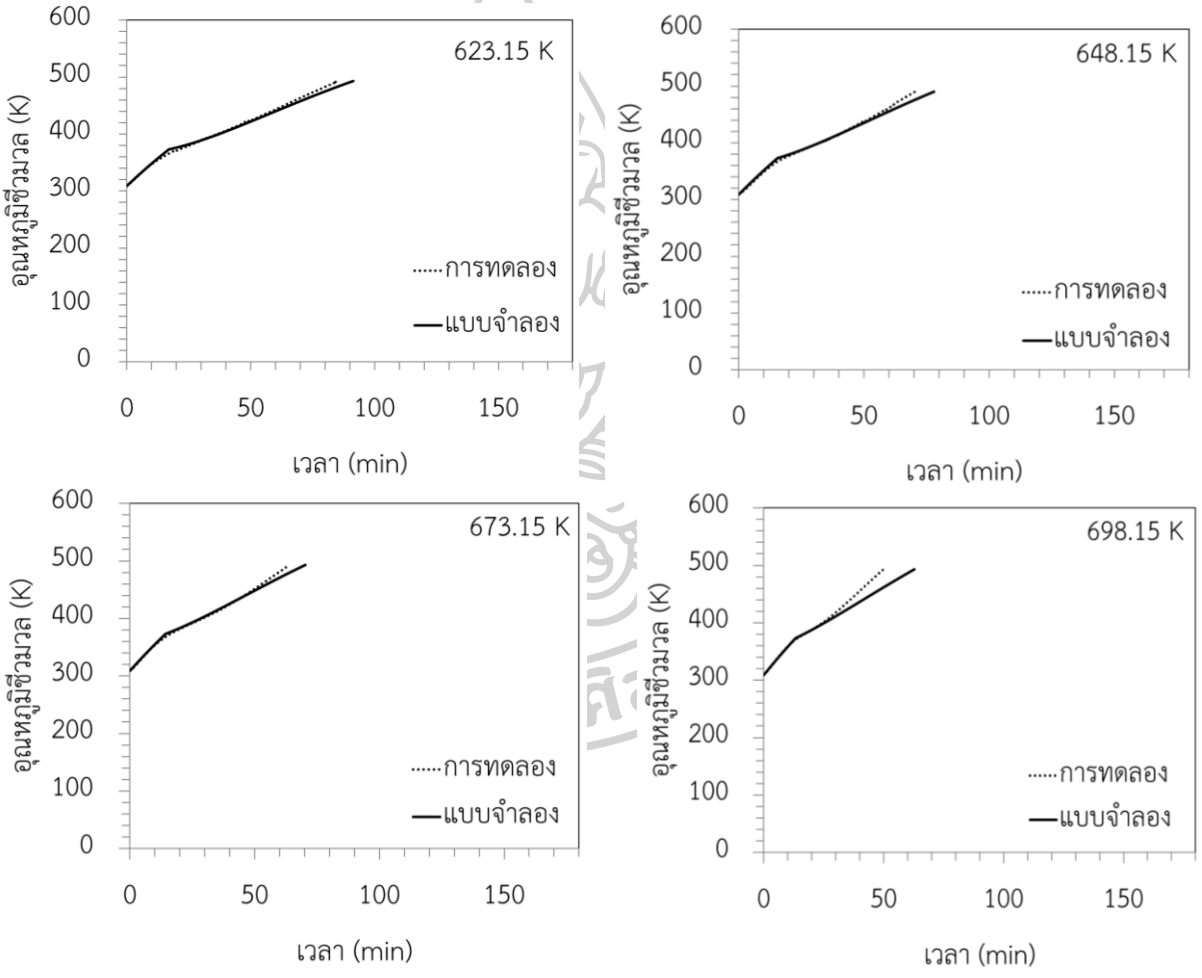
3.8 งบประมาณการวิจัย

สำหรับการวิจัยนี้จะใช้งบประมาณเพื่อดำเนินการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนเงิน 200,000 บาท (สองแสนบาทถ้วน)

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนและการประเมินความคลาดเคลื่อนของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

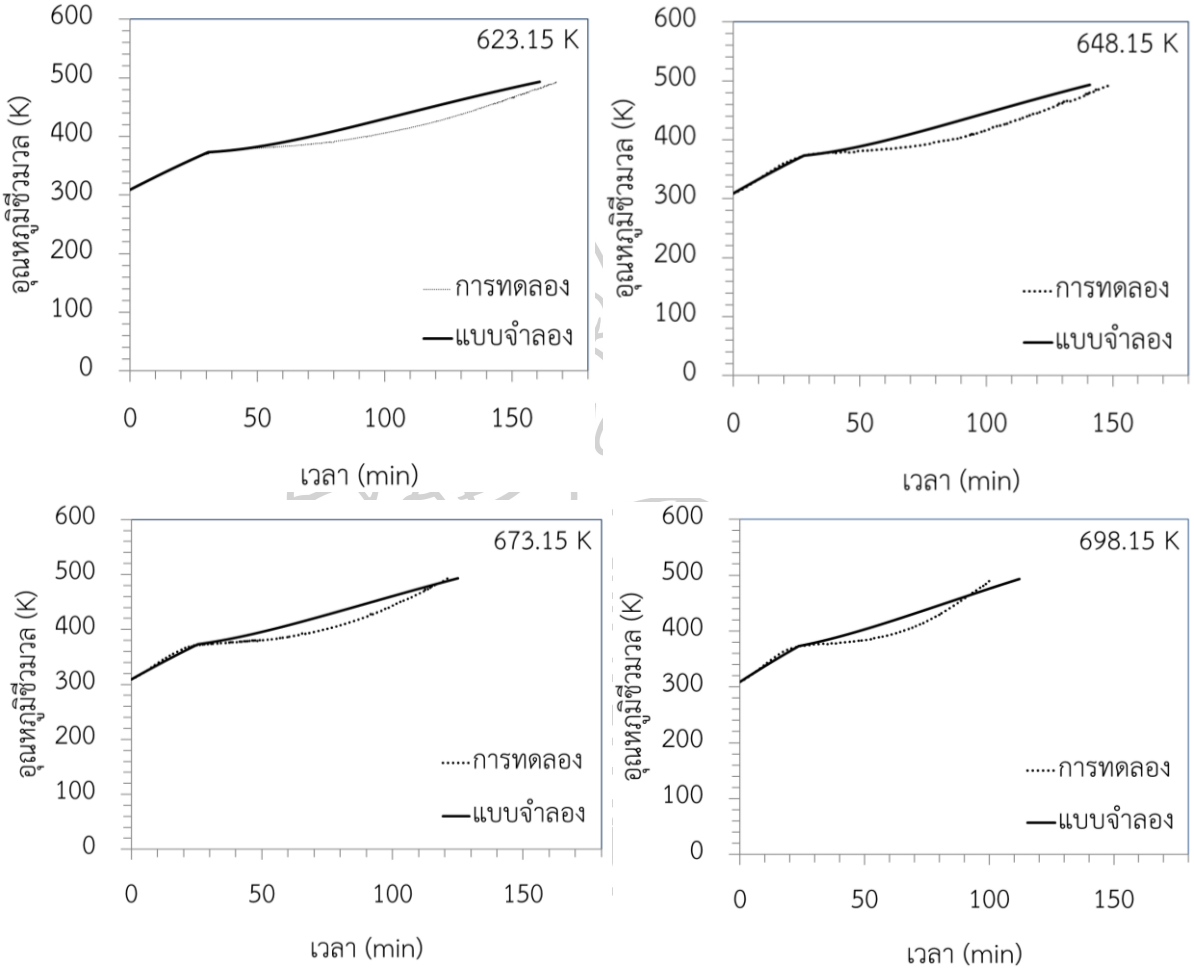
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการให้ความร้อน (Heating characteristic) ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในกรณีของฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ



ก.ฟางข้าว

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

เส้นทึบแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาในการทอรีไฟร์ของฟางข้าวและซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองและเส้นประแสดงผลการทำนายจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนสามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา



ข. ซังข้าวโพด

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน (ต่อ)

ในกรณีของฟางข้าวพบว่า ในช่วงอุ่นร้อนอุณหภูมิของฟางข้าวในเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้น อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ได้จากการทดลองมีค่า 3.09, 3.76, 4.14 และ 4.79 K/min และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีค่า

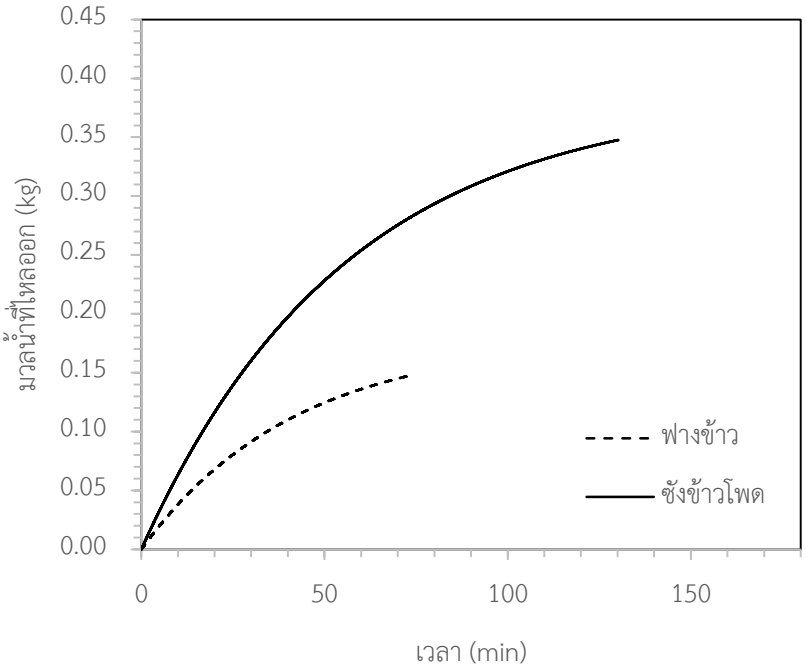
3.78, 4.14, 4.49 และ 4.85 K/min ที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ หลังจากนั้นในช่วงทำระเหยอุณหภูมิของฟางข้าวในเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆแบบไม่เป็นเชิงเส้น อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองมีค่า 1.88, 2.23, 2.49 และ 3.43 K/min และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีค่า 1.69, 1.93, 2.19 และ 2.47 K/min ที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟางข้าวภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาใดๆมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

ในกรณีของซังข้าวโพดพบว่า ในช่วงอุ่นร้อนอุณหภูมิของซังข้าวโพดในเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่พบในฟางข้าว อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ได้จากการทดลองมีค่า 2.05, 2.47, 2.55 และ 2.91 K/min อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีค่า 2.09, 2.30, 2.51 และ 2.71 K/min ที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ หลังจากนั้นในช่วงทำระเหยอุณหภูมิของซังข้าวโพดในเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นช้าๆอย่างไม่คงที่ เมื่อพิจารณาความชันเฉลี่ยในช่วงนี้จะพบว่ามีความชันที่แตกต่างกัน จะพบความชันที่มีค่าน้อยๆ (0.59, 0.50, 0.76 และ 0.94 K/min จากการทดลองและ 0.86, 0.99, 1.09 และ 1.28 K/min จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ) หลังจากนั้นความชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (1.44, 1.55, 2.24 และ 3.03 K/min จากการทดลองและ 1.04, 1.19, 1.33 และ 1.47 K/min แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ที่อุณหภูมิของอากาศร้อน 623.15, 648.15, 673.15 และ 698.15 K ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่า ในช่วงอุ่นร้อนการทำนายอุณหภูมิของซังข้าวโพดภายใน เตาปฏิกรณ์ที่เวลาใดๆสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองและในช่วงทำระเหยการทำนายอุณหภูมิของซังข้าวโพดภายในเตาปฏิกรณ์ที่เวลาใดๆจะสูงกว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย

จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟางข้าวเทียบกับเวลามีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบในกรณีของการดำเนินการทอรีไฟร์ชีวมวลผ่านเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นทรงกระบอกแบบเบดนิ่งในระดับห้องปฏิบัติการ [12], เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดไมโครเวฟในระดับห้องปฏิบัติการ [6, 22] และเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดโรตารี่คลินในระดับกึ่งอุตสาหกรรม [40] นั่นคือ จะพบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ชัดเจนเพียงสองช่วง แต่พบว่าแตกต่างจากรายงานของ Basu

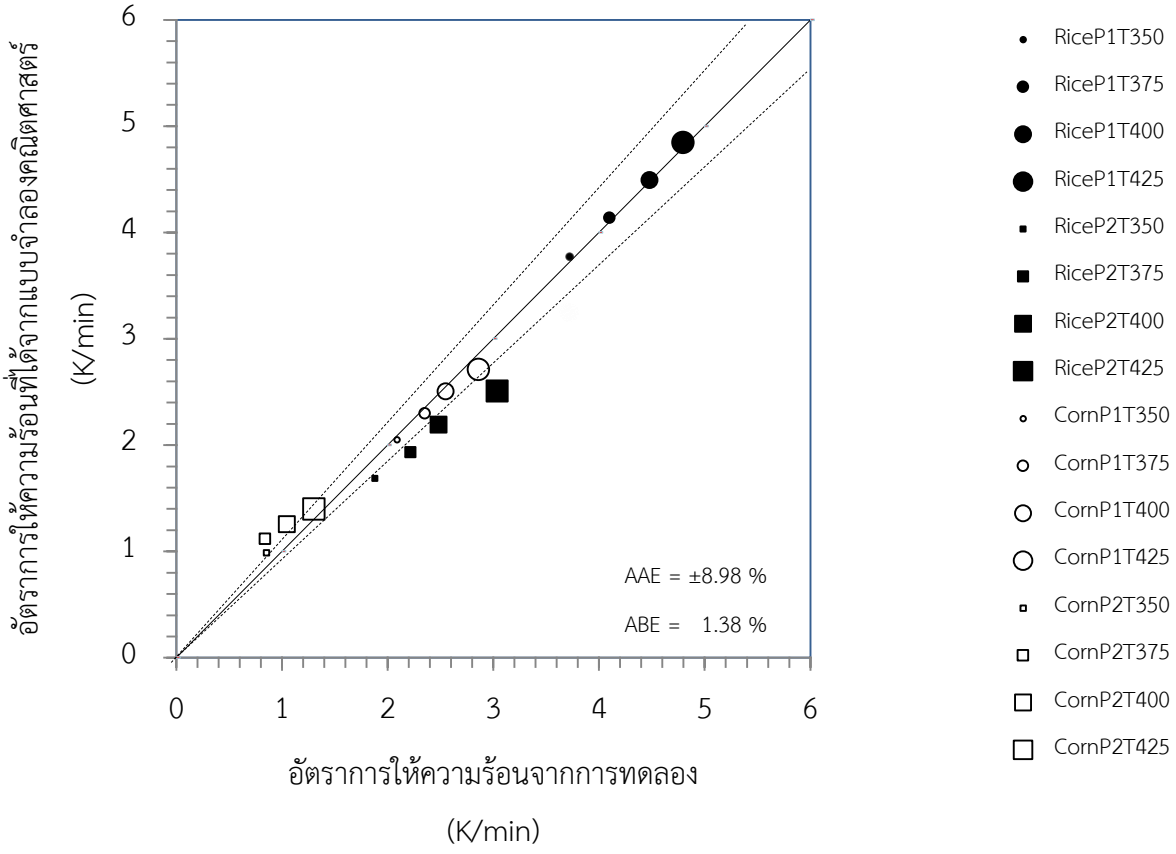
และคณะ [8] ที่ได้อธิบายขั้นตอนการให้ความร้อนชีวมวลผ่านการทอรีแฟคชั่นแบ่งออกเป็นสามช่วง คือการให้ความร้อน (Heating), การทำแห้ง (Drying) และหลังการทำแห้ง (Postdrying) อย่างไรก็ดี ลักษณะการให้ความร้อนที่รายงานโดย Basu และคณะ [8] มีความสอดคล้องกับที่พบในซังข้าวโพด นั่นคือ จะพบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามช่วง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นชี้ให้เห็นว่า สาเหตุที่พบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกันของชีวมวลทั้งสองชนิดนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของการสูญเสียความร้อนออกจากชีวมวลเนื่องจากการระเหยของน้ำในชีวมวลทั้งสอง ในขณะที่ยังไม่มีการระเหยน้ำ ความร้อนในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจะถ่ายเทสู่ชีวมวลทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิของชีวมวลมีค่าสูงขึ้นจนทำให้น้ำระเหยออกจากชีวมวลจะเกิดการดึงความร้อนออกจากชีวมวลในรูปของความร้อนแฝงจากการระเหยของน้ำ สิ่งนี้ขัดขวางการเพิ่มอุณหภูมิของชีวมวล ดังนั้น หากการระเหยน้ำมีค่ามากจนความร้อนในชีวมวลถูกดึงไปใช้ในการระเหยน้ำจนหมด จะไม่พบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชีวมวล รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการระเหยน้ำในฟางข้าวและซังข้าวโพดจากแบบจำลองการระเหยน้ำของ Page และคณะ[38] จะพบว่าซังข้าวโพดมีการระเหยน้ำมากกว่าฟางข้าวโดยเฉลี่ย 4.34 เท่าและมีระยะเวลาในการระเหยน้ำที่ยาวกว่า ดังนั้น จึงพบช่วงเวลาที่อุณหภูมิซังข้าวโพดเพิ่มขึ้นในอัตราน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับช่วงการทำแห้งที่อธิบายโดย Basu และคณะ [8] และไม่พบลักษณะเช่นนี้ในฟางข้าว

แม้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะสามารถทำนายลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ได้ค่อนข้างจะสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง แต่จะพบว่าการทำนายในช่วงทำระเหยยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากความขาดแคลนแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการระเหยน้ำออกจากชีวมวล ชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจะเรียงตัวในลักษณะเป็นชั้นหนาและเรียงตัวกันแน่น การจัดเรียงตัวแบบนี้แตกต่างกับการเรียงตัวในรายงานของ Page และคณะ [38] ซึ่งได้ดำเนินการทดลองโดยวางชีวมวลบนถาดกลมขนาดเล็กผ่านเครื่อง Thermogravimetrical analyzer ในระดับห้องปฏิบัติการ จึงส่งผลให้แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้สำหรับการจัดเรียงตัวของชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจึงควรเป็นประเด็นที่ควรดำเนินการต่อไป อย่างไรก็ดีจะพบว่า แบบจำลองการระเหยน้ำของ Page และคณะ [38] ยังให้ผลการทำนายที่น่าพอใจ



รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการระเหยน้ำในฟางข้าวและซังข้าวโพดจาก
แบบจำลองการระเหยน้ำของ Page และคณะ [38]

รูปที่ 4.3 แสดงผลการทำนายอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในกรณีของฟางข้าวและซังข้าวโพด แกนนอนแสดงอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ได้จากการทดลองและแกนตั้งแสดงอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น (K/min) ทั้งในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย กำหนดให้วงกลมคือระยะอุ่นร้อน สี่เหลี่ยมคือระยะทำระเหย จุดทึบคือฟางข้าว จุดโปร่งแสงคือซังข้าวโพดและขนาดของสัญลักษณ์คืออุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนจากต่ำไปสูง



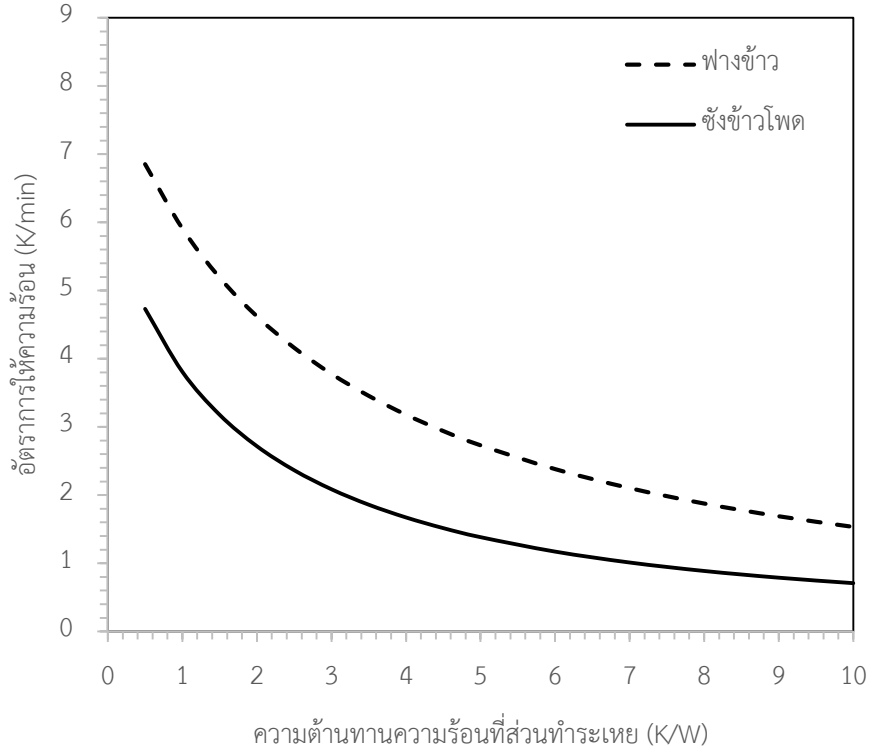
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทำนายอัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

จากรูปจะพบว่า การทำนายอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนมีค่าความคลาดเคลื่อน Absolute average error และ Absolute bias error เท่ากับ ±8.98 % และ 1.38 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อพิจารณาข้อมูลในระยะอุ่นร้อน ผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีความเข้ากันได้ดีกับผลที่ได้จากการทดลอง ส่วนในระยะทำระเหยผลการทำนายจะสามารถพบได้ทั้งค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าผลที่ได้จากการทดลอง อาจจะเป็นไปได้ว่า อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลน่าจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการระเหยน้ำของชีวมวล เมื่อพิจารณาอัตราการระเหยน้ำของฟางข้าวที่มีการระเหยน้ำอย่างช้าๆจะให้ผลการทำนายต่ำกว่าผลที่ได้จากการทดลอง (Under prediction) และอัตราการระเหยน้ำของซังข้าวโพดที่มีการระเหยน้ำที่ค่อนข้างรวดเร็วจะให้ผลการทำนายที่สูงกว่า (Over prediction) ทั้งนี้อาจจะพบผลการทำนายที่มีลักษณะเดียวกันในชีวมวลชนิดอื่นๆที่มีพฤติกรรมของการระเหยน้ำที่คล้ายคลึงกัน

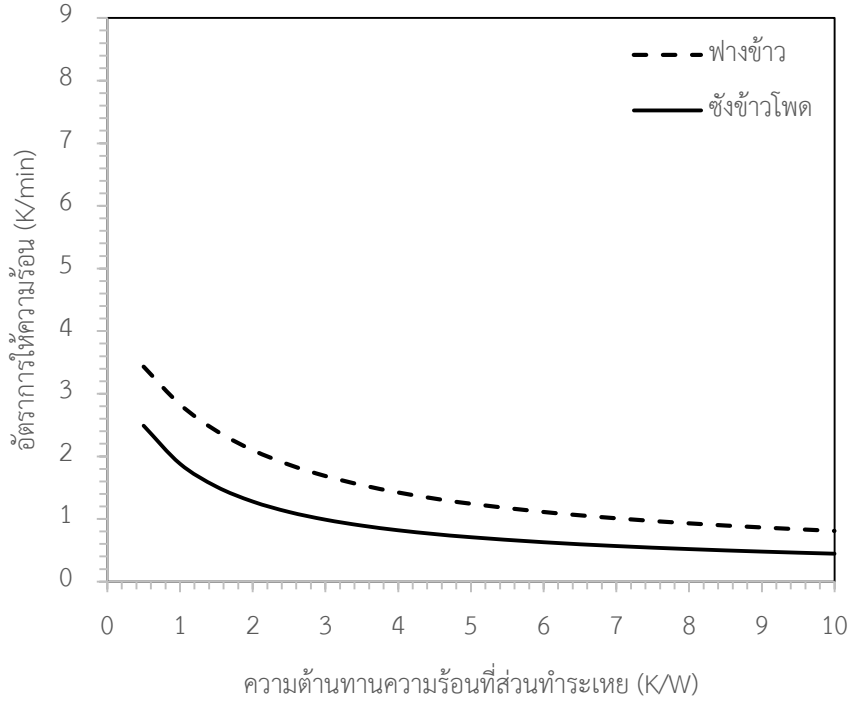
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจะประกอบด้วยขั้นตอนการให้ความร้อนสองช่วงคือการให้ความร้อนและการทำระเหย ในกรณีของฟางข้าวจะมีขั้นตอนการให้ความร้อนที่ชัดเจนสองช่วงและในกรณีของซังข้าวโพดจะมีขั้นตอนการให้ความร้อนสามช่วง ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นได้ชี้ให้เห็นว่าสาเหตุของลักษณะการให้ความร้อนของชีวมวลทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากลักษณะการระเหยน้ำที่แตกต่างกันนั่นเองและเราสามารถประเมินความคลาดเคลื่อนของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นพบว่าผลของการทำนายอัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน Absolute average error และ Absolute bias error เท่ากับ ±8.98 % และ 1.38 % ตามลำดับ ทั้งนี้ ผลการทำนายจะขึ้นอยู่กับอัตราการระเหยน้ำของชีวมวลด้วย

4.2 ผลของความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล

เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนอาศัยกลไกการส่งผ่านความร้อนของท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน โดยความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนจะเข้าสู่ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย (Evaporator section) ซึ่งติดตั้งอยู่ในส่วนให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ จากนั้นความร้อนจะทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและไหลไปยังส่วนควบแน่น (Condenser section) จากนั้นไอจะเกิดการควบแน่นและถ่ายเทความร้อนไปยังชีวมวลที่อยู่รอบๆ ของพื้นผิวของส่วนควบแน่น ความร้อนนี้ทำให้อุณหภูมิชีวมวลสูงขึ้นเป็นผลให้เกิดช่วงอุ่นร้อนและช่วงทำระเหยตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความร้อนที่เข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายเทเข้าสู่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนหรืออีกนัยหนึ่งคือความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนจะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล

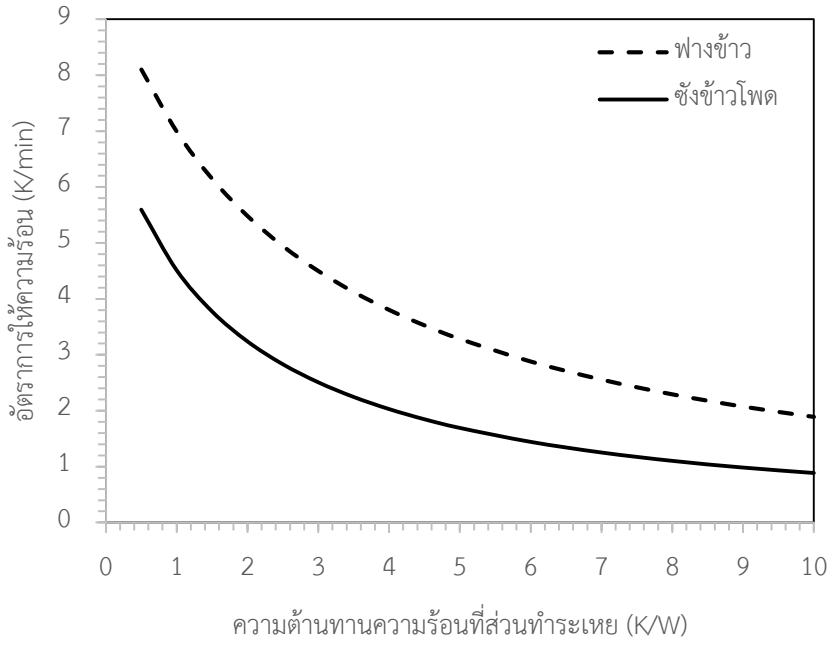


ก. ระยะอุ่นร้อน

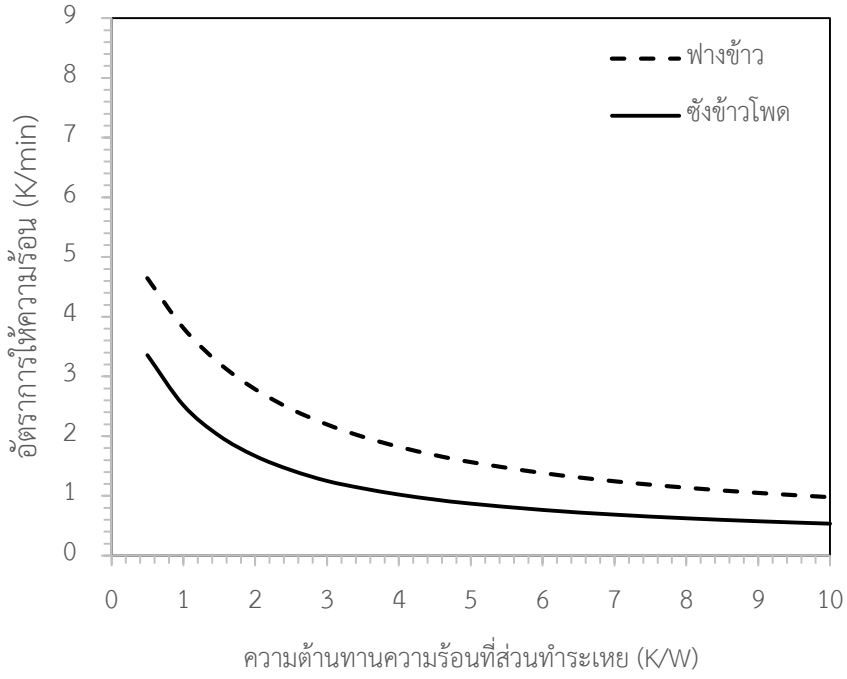


ข. ระยะทำระเหย

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K



ก. ระยะอุ่นร้อน



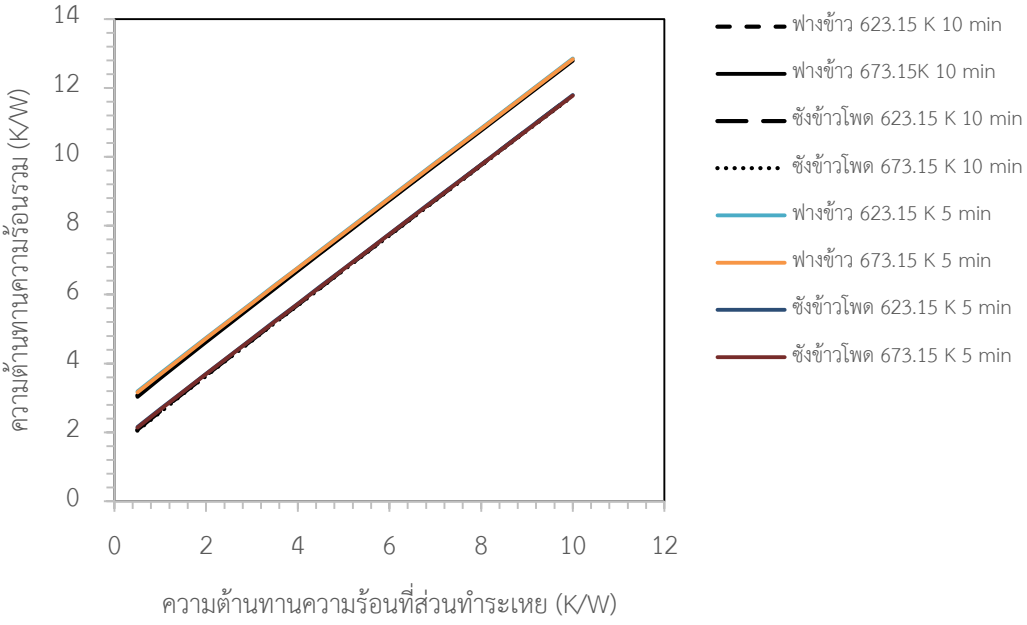
ข. ระยะทำระเหย

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K

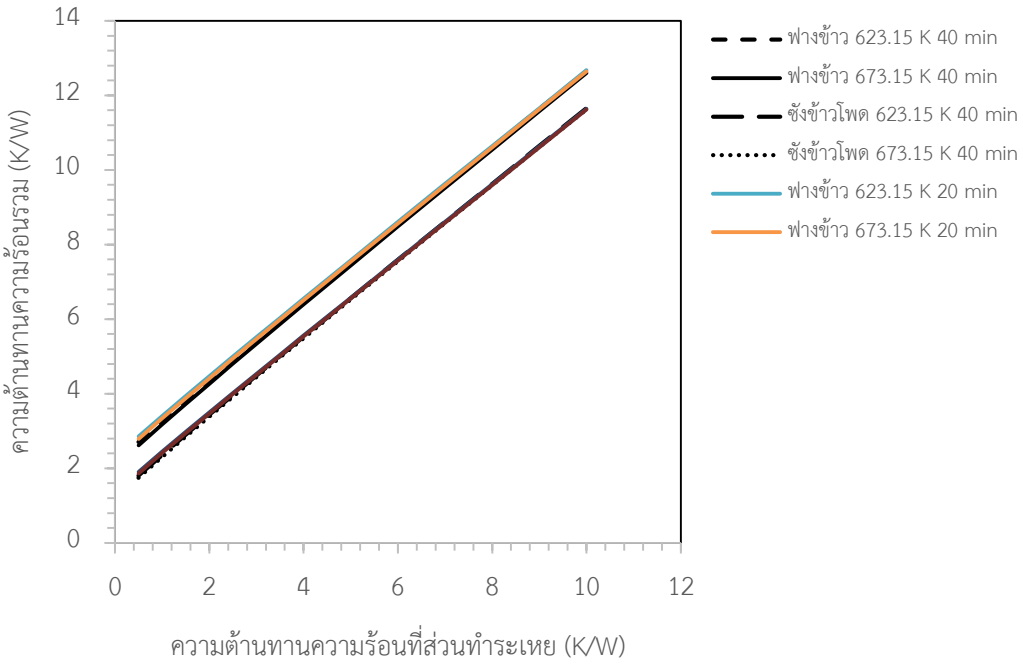
รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหยที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K และ 673.15 K ตามลำดับ กำหนดให้เส้นประคือฟางข้าวและเส้นทึบคือซังข้าวโพด จากรูปพบว่าเมื่อค่าความต้านทานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 K/W เป็น 3.0 K/W ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 6.85 K/min เป็น 3.78 K/min (ฟางข้าว) และลดลงจาก 4.73 K/min เป็น 2.09 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 3.43 K/min เป็น 1.69 K/min (ฟางข้าว) และลดลงจาก 2.49 K/min เป็น 0.99 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย (ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่าลดลงจาก 8.10 K/min เป็น 4.49 K/min (ฟางข้าว) และลดลงจาก 5.60 K/min เป็น 2.51 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและมีค่าลดลงจาก 4.61 K/min เป็น 2.19 K/min (ฟางข้าว) และลดลงจาก 3.36 K/min เป็น 1.18 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย) เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานความร้อนจะพบว่า ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K มีค่า 1.211 W/min (ฟางข้าว) และ 1.030 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและมีค่า 0.681 W/min (ฟางข้าว) และ 0.574 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย (ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่า 1.419 W/min (ฟางข้าว) และ 1.201 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและมีค่า 0.959 W/min (ฟางข้าว) และ 0.827 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย) เมื่อค่าความต้านทานความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.5 K/W เป็น 10.0 K/W ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงค่อนข้างเป็นเชิงเส้นจาก 3.46 K/min เป็น 1.53 K/min (ฟางข้าว) และลดลงจาก 1.86 K/min เป็น 0.71 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงจาก 1.54 K/min เป็น 0.81 K/min (ฟางข้าว) และลดลงจาก 0.89 K/min เป็น 0.44 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย (ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่าลดลงจาก 4.12 K/min เป็น 1.89 K/min (ฟางข้าว) และลดลงจาก 2.25 K/min เป็น 0.89 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและมีค่าลดลงจาก 1.99 K/min เป็น 0.98 K/min (ฟางข้าว) และ 1.13 K/min เป็น 0.53 K/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย) เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานความร้อนจะพบว่า มีค่า 0.291 W/min (ฟางข้าว) และ

0.172 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและมีค่า 0.377 W/min (ฟางข้าว) และ 0.067 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย (ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่า 0.338 W/min (ฟางข้าว) และ 0.204 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะอุ่นร้อนและมีค่า 0.151 W/min (ฟางข้าว) และ 0.087 W/min (ซังข้าวโพด) สำหรับในระยะทำระเหย) จะเห็นได้ชัดเจนว่า อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของความต้านทานความร้อนเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่าน้อยๆ (0.5 ถึง 3.0 K/W) และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างช้าๆเป็นเชิงเส้นเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่ามาก (3.5 ถึง 10.0 K/W) แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในลักษณะนี้ให้ผลที่คล้ายคลึงกันกับงานวิจัยที่ทำการศึกษาโดยใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนในการส่งผ่านความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการที่ความต้านทานความร้อนจาก 0.02 – 0.09 K/W จะมีอัตราการส่งผ่านความร้อนอยู่ในช่วงที่ลดลงจาก 150 เป็น 50 W ตามลำดับ [41, 42] จากแบบจำลองการทำนายการส่งผ่านความร้อน ESDU 81038 [43] จะพบว่าอัตราการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนจะเป็นสัดส่วนผกผันกับ ความต้านทานความร้อนรวม (Inverse variation) ดังนั้น เมื่อความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงของความต้านทานความร้อนที่มีค่าน้อยๆและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างช้าๆในช่วงของความต้านทานความร้อนที่มีค่ามากๆ และเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยจะส่งผลให้ความต้านทานความร้อนรวมเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนและ ความต้านทานความร้อนที่ส่วนควบแน่นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 4.7 และเมื่อความต้านทานความร้อนรวมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนและความต้านทานความร้อนที่ส่วนควบแน่นเปลี่ยนแปลงไปอย่างน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทั้งในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหยตามลำดับ สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความต้านทานความร้อนรวมจะขึ้นอยู่กับความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยมากกว่าความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนและความต้านทานความร้อนที่ส่วนควบแน่นนั่นเอง เมื่อพิจารณาในแง่ของการควบคุมเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจะพบว่า มีสองปัจจัยในการกำหนดค่าของความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหย ได้แก่ ความเร็วของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและการเกิดตะกรันที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ปัจจัยทั้งสองนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน ดังนั้น เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่ออกแบบให้ความต้านทานความร้อนเริ่มต้นมีค่า

น้อยเมื่อต้องการอัตราการให้ความร้อนที่สูงก็มีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมชนิดของเชื้อเพลิงและหมั่นทำความสะอาดคราบตะกรันออกจากส่วนทำระเหยของท่อความร้อน

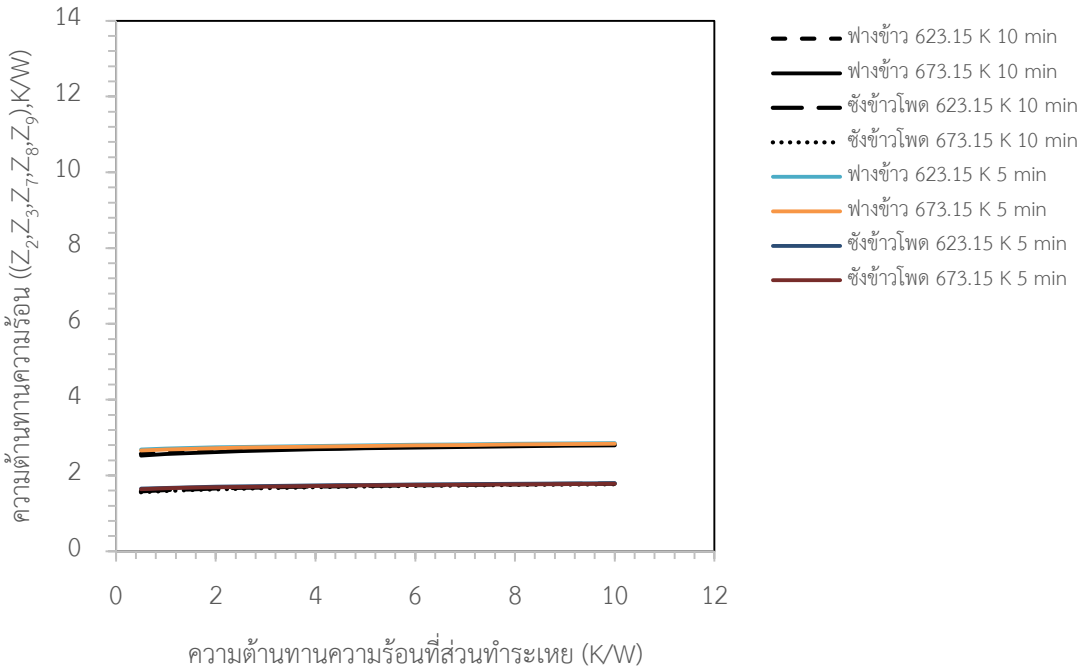


ก. ระยะอุ่นร้อน

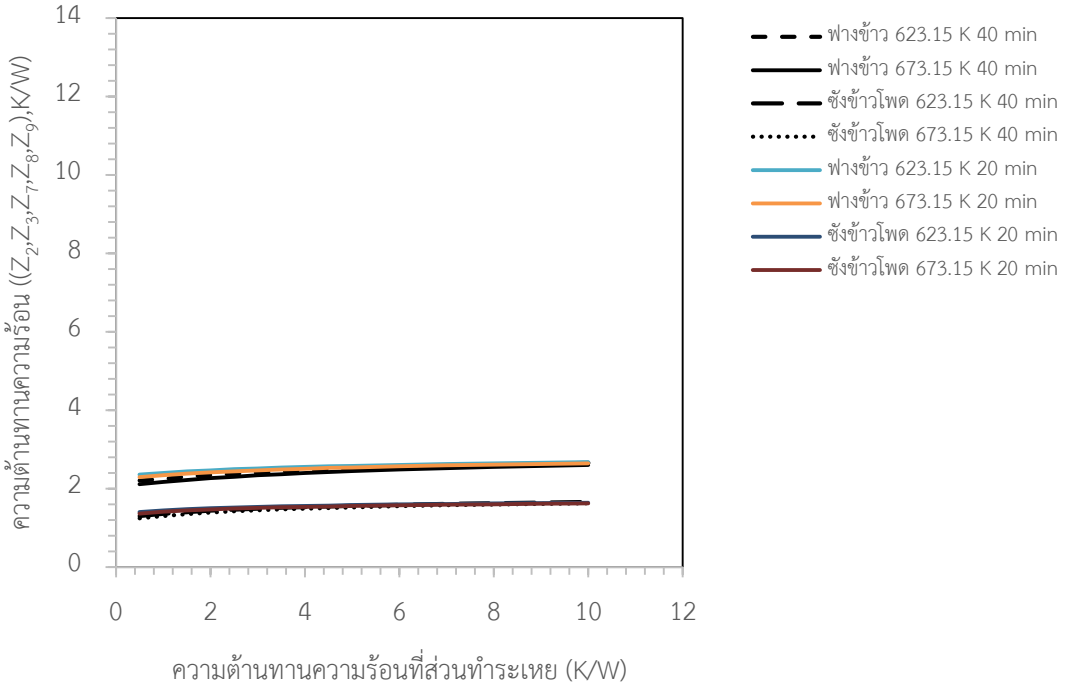


ข. ระยะทำระเหย

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยและความต้านทานความร้อนรวม

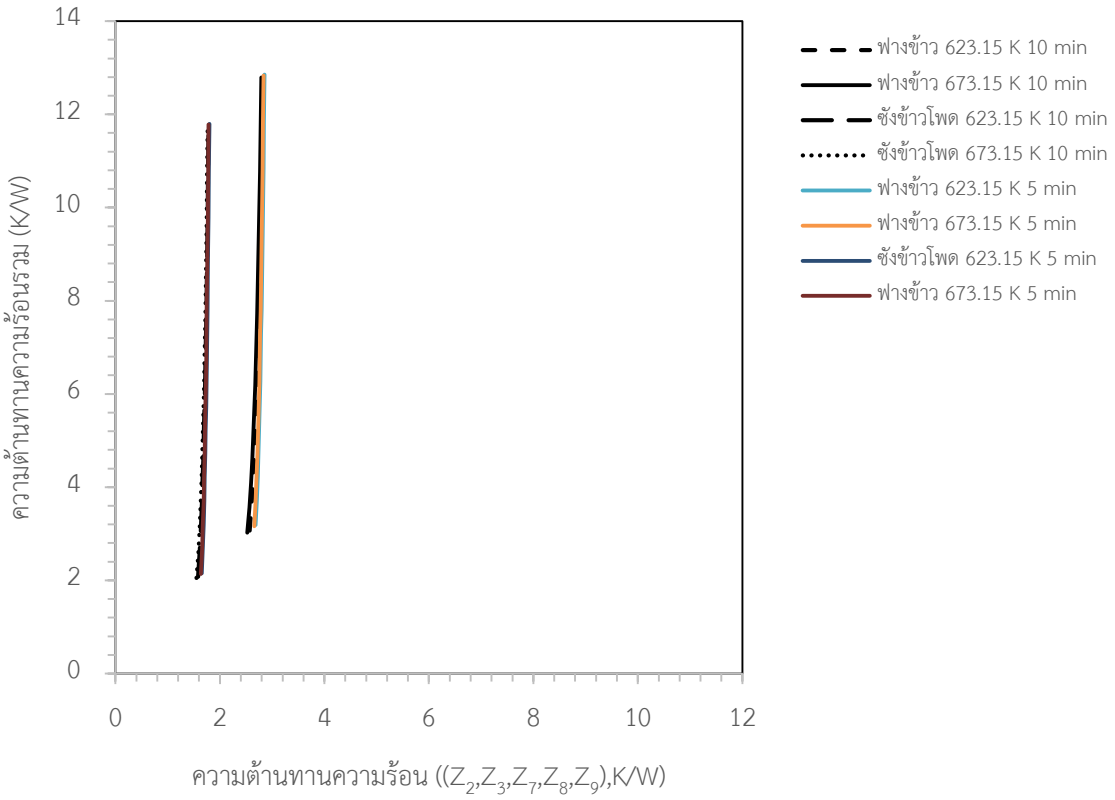


ก. ระยะอุ่นร้อน

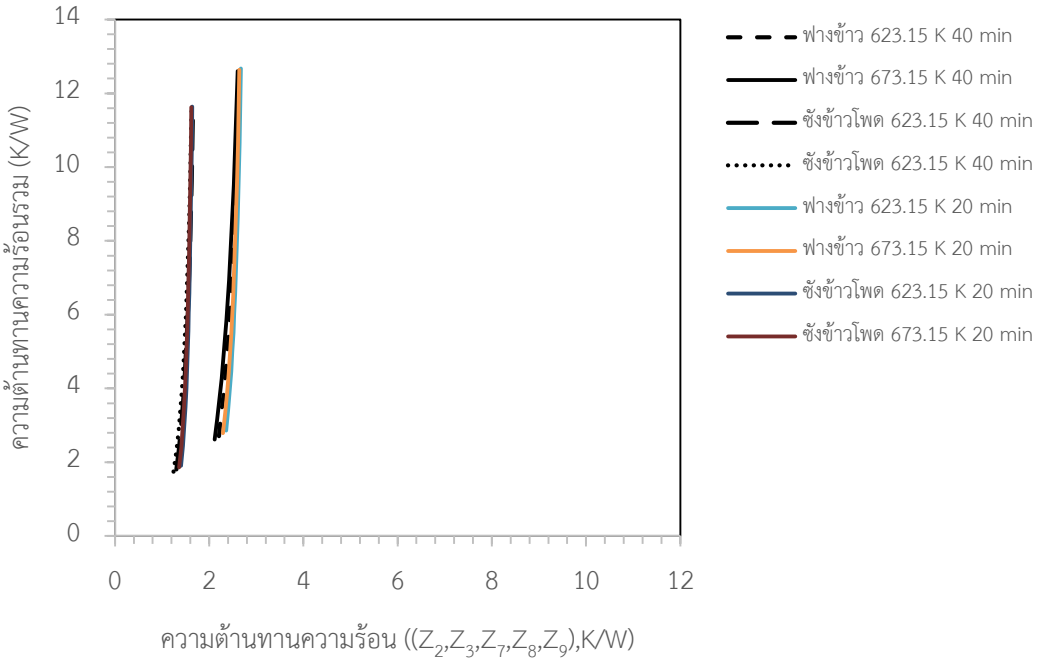


ข. ระยะทำระเหย

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยและความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนและความต้านทานความร้อนที่ส่วนควบแน่น (Z_2, Z_3, Z_7, Z_8, Z_9)



ก. ระยะอุ่นร้อน



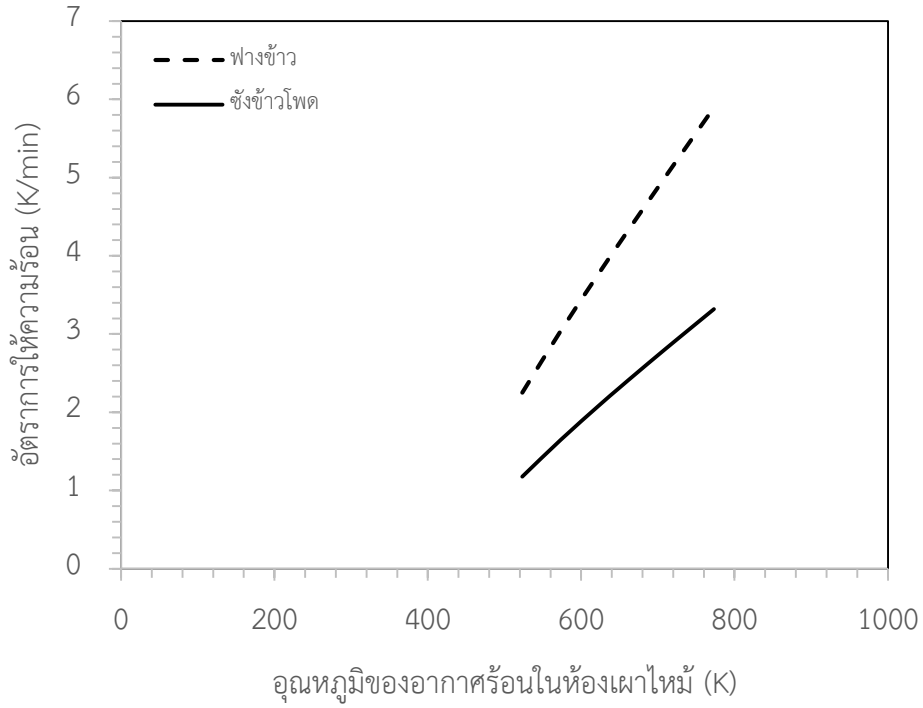
ข. ระยะทำระเหย

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนและความต้านทานความร้อนที่ส่วนควบแน่น (Z_2, Z_3, Z_7, Z_8, Z_9) และความต้านทานความร้อนรวม

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ผลของความต้านทานร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล พบว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของความต้านทานความร้อนเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่าน้อยๆ (0.5 ถึง 3.0 K/W) และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างช้าๆเป็นเชิงเส้นเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่ามาก (3.5 ถึง 10.0 K/W) ทั้งฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย

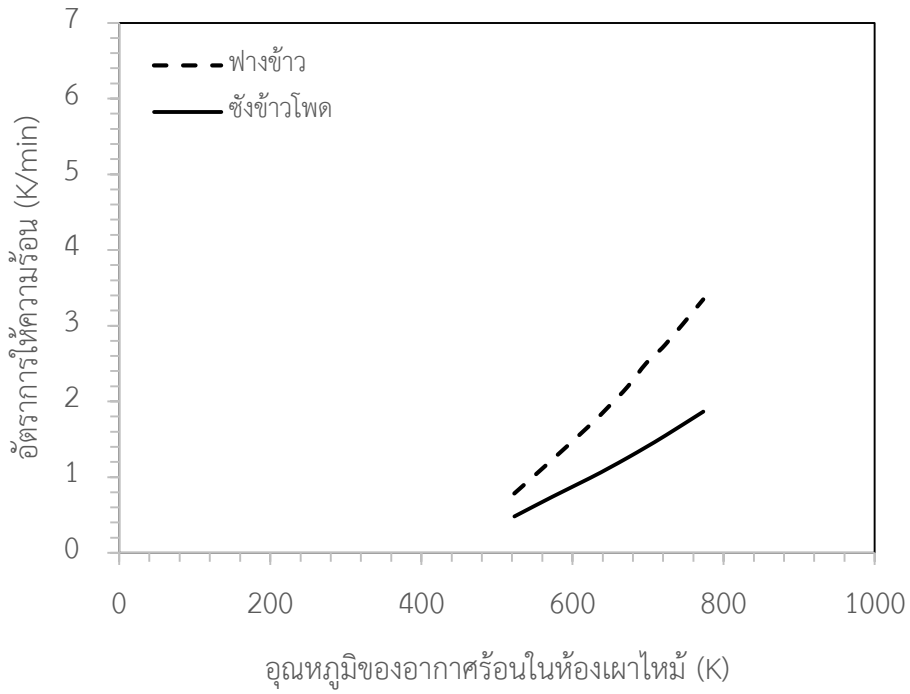
4.3 ผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย กำหนดให้เส้นประและเส้นทึบแสดงอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ



ก. ระยะอุ่นร้อน

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

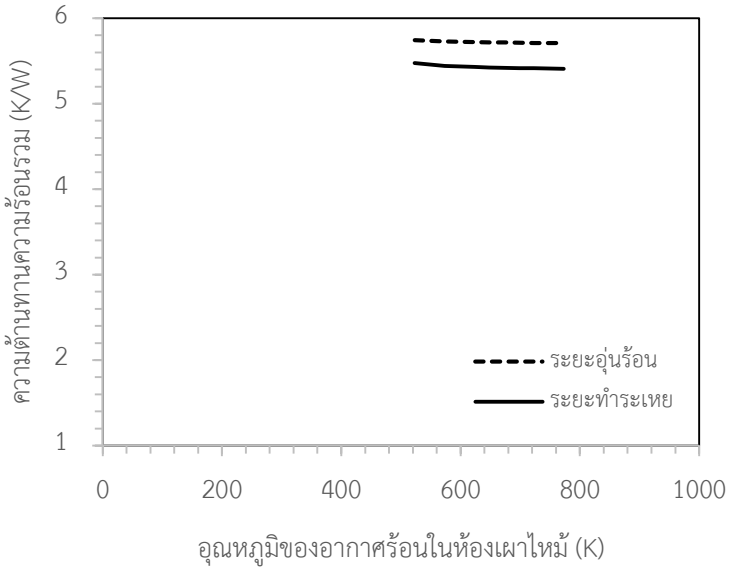


ข. ระยะทำระเหย

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น (ต่อ)

แกนตั้งแสดงอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล (K/min) แกนนอนแสดงอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ (K) จากรูปพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้จาก 523.15 K ไปยัง 773.15 K จะส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้นในระยะอุ่นร้อนจาก 2.25 K/min เป็น 5.90 K/min สำหรับฟางข้าวและ 1.17 K/min เป็น 3.32 K/min สำหรับซังข้าวโพด และในระยะทำระเหยอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเกือบเป็นเชิงเส้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.79 K/min เป็น 3.34 K/min สำหรับฟางข้าวและ 0.48 K/min เป็น 1.86 K/min สำหรับซังข้าวโพด เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลพบว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิของอากาศร้อนสูงสุดมีค่ามากกว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิของอากาศร้อนต่ำสุด 2.62 เท่าและ 2.28 เท่าสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะอุ่นร้อนตามลำดับและ 4.25 เท่าและ 3.88 เท่าสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะทำระเหยตามลำดับและอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเทียบ

กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้พบว่าในระยะอุ่นร้อนมีค่า 0.015 min^{-1} และ 0.009 min^{-1} สำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ ในระยะทำระเหยมีค่า 0.010 min^{-1} และ 0.005 min^{-1} สำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ ซึ่งแนวโน้มในลักษณะนี้จะคล้ายคลึงกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบในกรณีของการทอรีไฟร์ชีวมวลผ่านเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบเบดดิ่งระดับห้องปฏิบัติการ เตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบทรงกระบอกระดับห้องปฏิบัติการและเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นแบบไมโครเวฟระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนอยู่ในช่วง 523.15 – 553.15 K , 493.15 – 553.15 K และ 200 – 300 W จะมีอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 8.33 เป็น 9.33 K/min , จาก 3.26 เป็น 6.25 K/min และ 41.67 เป็น 104.17 K/min ตามลำดับ [12, 44, 45]



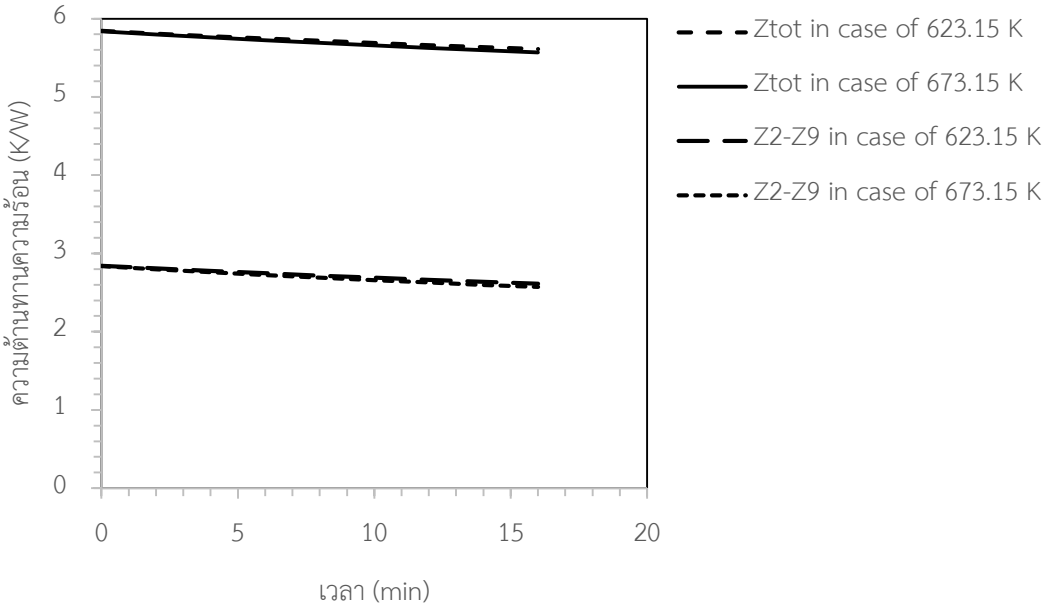
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และความต้านทานความร้อนรวม

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และความต้านทานความร้อนรวมของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย แกนนอนแสดงอุณหภูมิของอากาศร้อนใน

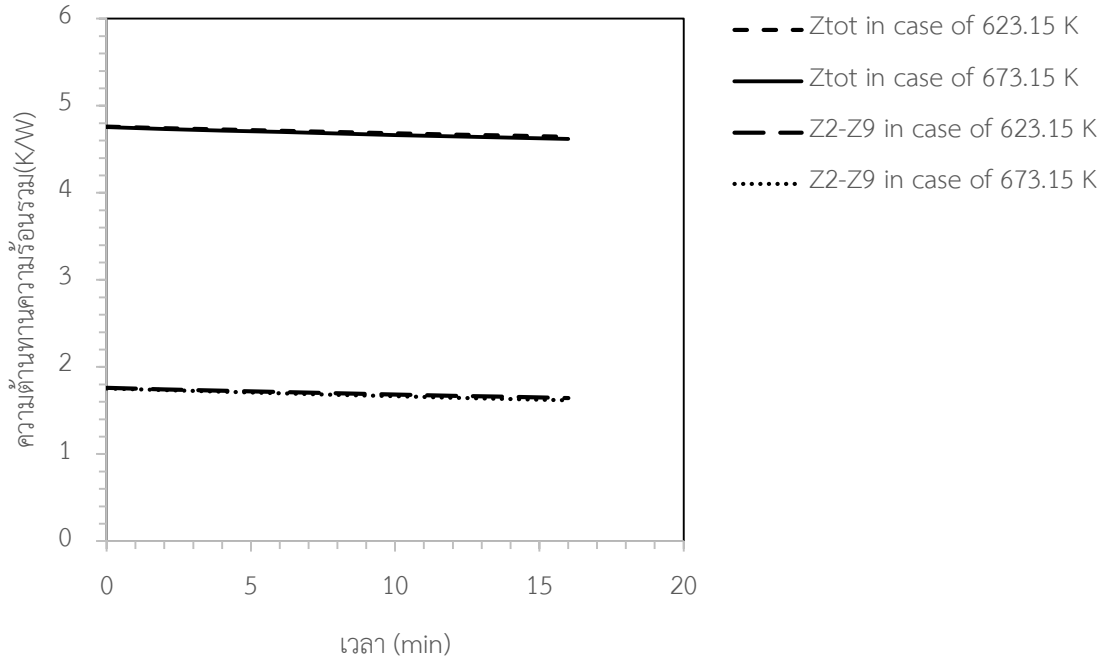
ห้องเผาไหม้ (K) และแกนตั้งแสดงความต้านทานความร้อนรวม (K/W) กำหนดให้เส้นประคือระยะอุ่นร้อนและเส้นทึบคือระยะทำระเหย จากรูปพบว่าเมื่อพิจารณาความชันในระยะอุ่นร้อนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้จะส่งผลให้ความต้านทานความร้อนรวมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างน้อยมากและในระยะทำระเหยเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้มีค่าน้อยๆ ความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่ามากขึ้นและเมื่ออุณหภูมิของความร้อนในห้องเผาไหม้มีค่ามากๆ ความต้านทานความร้อนรวมจะมีความชันค่อยๆลดลงจนเกือบขนานกับค่าของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ เมื่อพิจารณาแบบจำลองการทำนายการส่งผ่านความร้อน ESDU 81038 พบว่าอัตราการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ (Direct variation) และเป็นสัดส่วนผกผันกับความต้านทานความร้อน ดังนั้น ในระยะอุ่นร้อนที่ช่วงอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้มีค่าน้อยๆจะทำให้อัตราการให้ความร้อนของชีวมวลมีค่าน้อยๆตามไปด้วยและที่ช่วงอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้มีค่ามากๆจะทำให้อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่ามากตามไปด้วยเป็นเชิงเส้น ซึ่งพบเช่นเดียวกันกับในระยะทำระเหยแต่ความชันระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้กับอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลนั้นมีค่าค่อนข้างเกือบจะเป็นเชิงเส้น เนื่องจากเมื่อเวลาในการดำเนินการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานความร้อนรวมและความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนและความต้านทานความร้อนที่ส่วนควบแน่นมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างน้อยมากในระยะอุ่นร้อนและจะมีค่าค่อยๆลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นในระยะทำระเหยดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ สามารถเห็นได้ว่าความต้านทานความร้อนจะส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ในระยะทำระเหยมากกว่าในระยะอุ่นร้อนนั่นเอง

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นพบว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้สูงสุดมากกว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ต่ำสุด 2.62 เท่าและ 2.28 เท่าสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะอุ่นร้อนและมีค่า 4.25 เท่าและ 3.88 เท่าสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะทำระเหยและอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ใน

ระยะอุ่นร้อนมีค่า 0.015 min^{-1} และ 0.009 min^{-1} สำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ ในระยะทำระเหยมีค่า 0.010 min^{-1} และ 0.005 min^{-1} สำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ

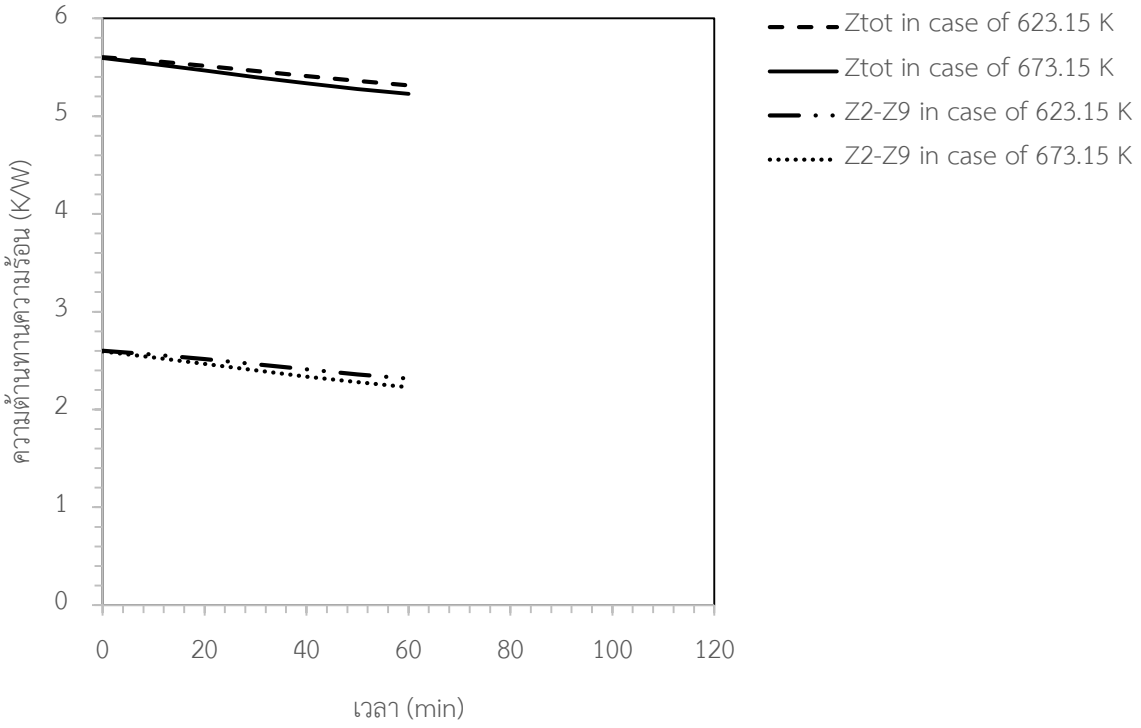


ก. ฟางข้าว

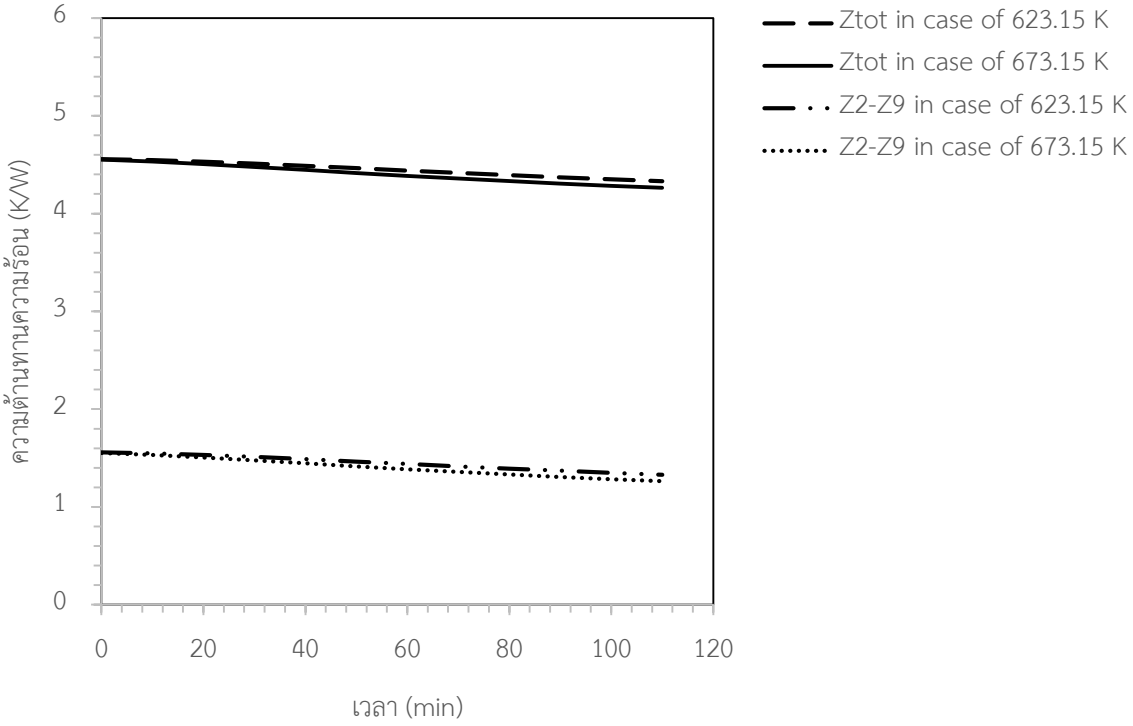


ข. ซังข้าวโพด

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความต้านทานความร้อนในระยะอุ่นร้อน



ก. ฟางข้าว

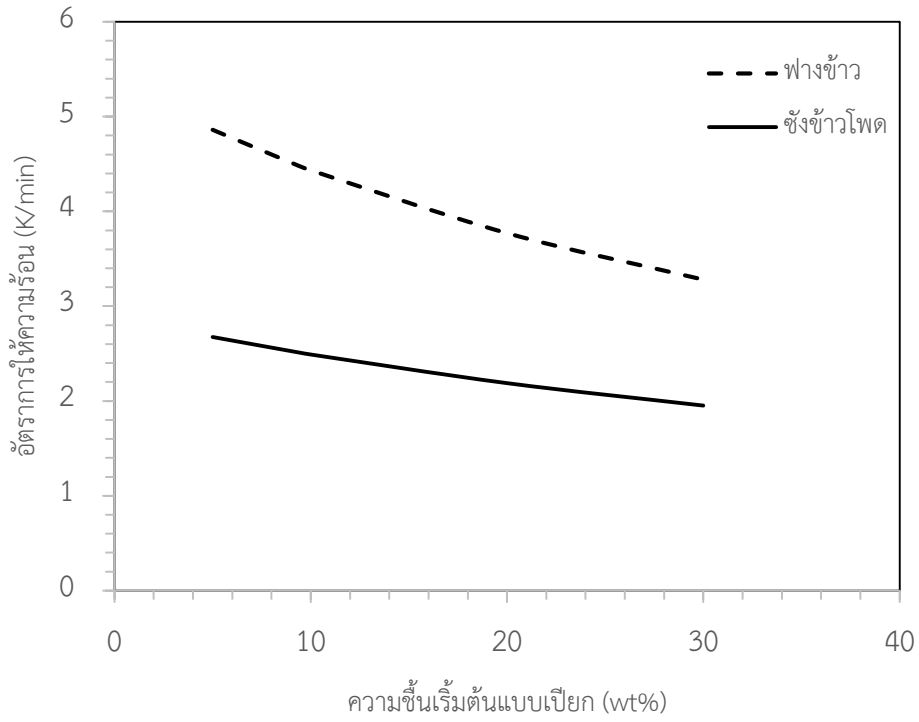


ข. ซังข้าวโพด

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความต้านทานความร้อนในระยะทำระเหย

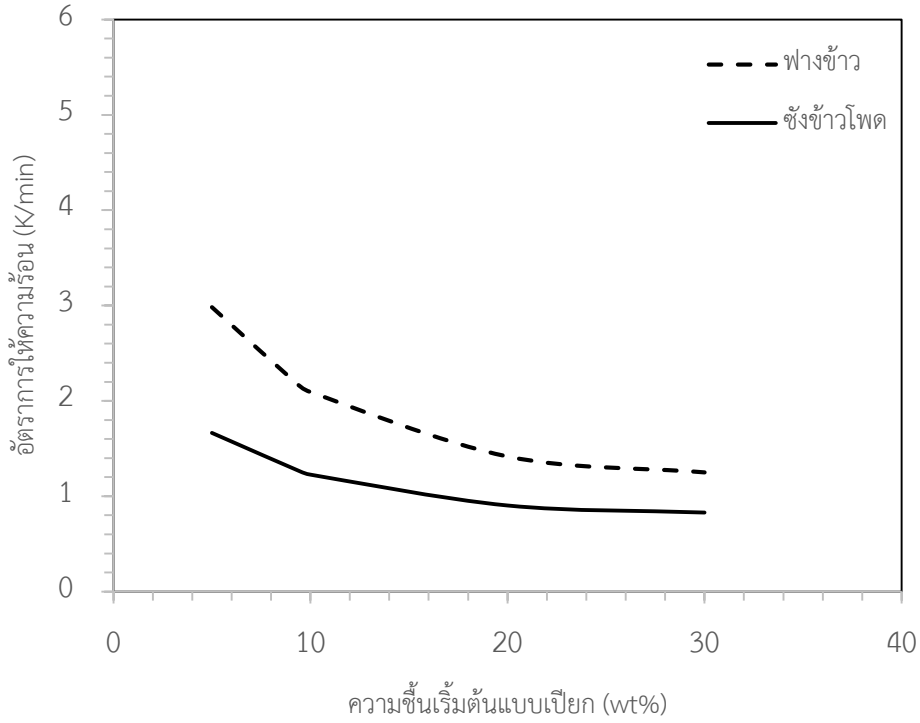
4.4 ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหยตามลำดับ แกนนอนแสดงปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียก (wt%) แกนตั้งแสดงอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล (K/min) กำหนดให้เส้นประและเส้นทึบแทนอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ



ก. ระยะอุ่นร้อน

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

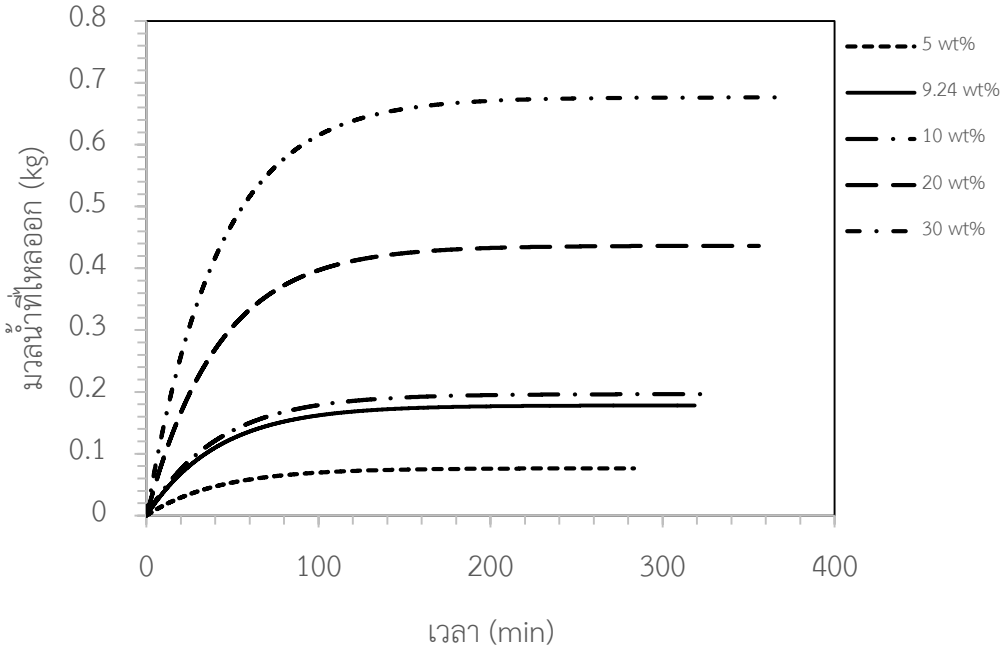


ข. ระยะทำระเหย

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกและอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

จากรูปพบว่าในระยะอุ่นร้อนเมื่อความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 wt% เป็น 30 wt% อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้นจาก 4.86 K/min เป็น 3.2 K/min สำหรับฟางข้าว และค่อยๆลดลงจาก 2.67 K/min เป็น 2.49 K/min สำหรับซังข้าวโพด ในระยะทำระเหยจะพบความชันเป็นสองช่วงคือ เมื่อความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 wt% เป็น 10 wt% อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 2.98 K/min เป็น 2.09 K/min สำหรับฟางข้าว และค่อยๆลดลงจาก 1.66 K/min เป็น 1.23 K/min สำหรับซังข้าวโพดและเมื่อความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 wt% เป็น 30 wt% อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างช้าๆจาก 2.09 K/min เป็น 1.25 K/min สำหรับฟางข้าวและค่อยๆลดลงจาก

1.23 K/min เป็น 0.83 K/min สำหรับซังข้าวโพด เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกในระยะอุ่นร้อนมีค่า 0.06 K/wt%min (ฟางข้าว) และ 0.03 K/wt%min (ซังข้าวโพด) ในระยะทำระเหยอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกจาก 5 wt% ถึง 10 wt% มีค่า 0.181 K/wt%min (ฟางข้าว) และ 0.089 K/wt%min (ซังข้าวโพด) อัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกจาก 10 wt% ถึง 30 wt% มีค่า 0.042 K/wt%min (ฟางข้าว) และ 0.020 K/wt%min (ซังข้าวโพด) จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นในชีวมวลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลง แนวโน้มของอัตราการให้ความร้อนในลักษณะนี้ให้ผลที่คล้ายคลึงกันกับงานวิจัยของ Sadaka และคณะ [46]และ งานวิจัยของ Beamish และ Hamilton [47] ที่ได้รายงานผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 19.8715 ถึง 20.1766 wt% และ 2 ถึง 10 wt% จะให้อัตราการให้ความร้อนลดลงจาก 10 เป็น 2 K/min และลดลงจาก 10 เป็น 0.2 K/min ตามลำดับ จากการพิจารณาแบบจำลองคณิตศาสตร์จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์พบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิชีวมวลเทียบกับเวลาเป็นสัดส่วนผกผันกับมวล ดังนั้น ในระยะอุ่นร้อน ในช่วงที่ชีวมวลมีปริมาณความชื้นน้อยๆจะทำให้อุณหภูมิชีวมวลมีค่ามาก และในช่วงที่ชีวมวลมีปริมาณความชื้นมากๆจะทำให้อุณหภูมิชีวมวลมีค่าน้อยและอัตราการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนจะถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิให้กับชีวมวลแห้งและเพิ่มอุณหภูมิให้กับมวลน้ำในชีวมวลพร้อมกันไปด้วย โดยปริมาณความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือปริมาณความชื้นเกาะเกี่ยวและปริมาณความชื้นอิสระ เนื่องจากยังไม่มีการสูญเสียมวลน้ำในระยะนี้ เมื่อมวลน้ำได้รับความร้อนปริมาณความชื้นเกาะเกี่ยวจะถูกสลายพันธะทำให้เกิดการถ่ายเทของมวลน้ำนี้ไปยังบริเวณผิวหน้าของชีวมวลเพื่อเตรียมที่จะเข้าสู่กระบวนการทำระเหยหรือการสูญเสียมวล จึงทำให้ชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นน้อยๆ (5 – 10 wt%) เป็นไปได้ว่า จะใช้เวลาที่ค่อนข้างน้อยในการถ่ายเทมวลน้ำและชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นมากๆ (20 – 30 wt%) ก็จะใช้เวลาที่มากขึ้นในการถ่ายเทมวลน้ำเช่นกันและในระยะทำระเหยเนื่องจากเกิดการสูญเสียของมวลน้ำที่เกิดจากกระบวนการทำระเหยในระยะนี้ รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการระเหยน้ำออกจากชีวมวลจากแบบจำลองการระเหยน้ำของ Page และคณะ [38] แกนนอนแสดงเวลา (min) และแกนตั้งแสดงมวลน้ำที่ไหลออก (kg)



รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการระเหยน้ำออกจากชีวมวลจาก
แบบจำลองการระเหยน้ำของ Page และคณะ [38]

จากรูปพบว่า ชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นน้อยๆ (5 – 10 wt%) จะใช้เวลาที่ค่อนข้างน้อยในการถ่ายเทมวลน้ำเนื่องจากการทำระเหยและชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นมากๆ (20 – 30 wt%) จะใช้เวลาที่มากขึ้นในการถ่ายเทมวลน้ำเนื่องจากการทำระเหยที่มากขึ้นเป็นผลมาจากอัตราการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับชีวมวลและถูกนำมาใช้ในการถ่ายเทมวลเนื่องจากการทำระเหยของมวลน้ำในชีวมวล โดยปริมาณความชื้นอิสระที่อยู่บริเวณผิวหน้าของชีวมวลจะถูกทำให้ระเหยก่อน จากนั้นปริมาณความชื้นเกาะเกี่ยวจะถูกสลายพันธะด้วยความร้อนและค่อยๆเกิดการถ่ายเทมวลน้ำนั้นมาที่ผิวหน้าและระเหยออกไปจนกระทั่งชีวมวลมีความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในขณะนั้น จึงเป็นที่ชัดเจนว่า ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นน้อยๆ (5 – 10 wt%) จะมีอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมากเพราะใช้เวลาในการถ่ายเทมวลน้ำน้อยและที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นมากๆ (10 – 30 wt%) จะมีอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่น้อยเพราะใช้เวลาในการถ่ายเทมวลน้ำที่ค่อนข้างนานกว่า

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น พบว่า ปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกในชีวมวลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้นในระยะอุ่นร้อน และในระยะทำระเหย เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่าน้อยๆ (5 - 10 wt%) อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่ามากๆ (10 - 30 wt%) อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างช้าๆ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

การสร้างเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบด้วยท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอนผ่านหลักการทำงานของการส่งผ่านความร้อนของสารทำงานในระบบสุญญากาศสำหรับใช้ในการส่งผ่านความร้อนจากท่อเทอร์โมไซฟอนไปยังเตาปฏิกรณ์ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนและการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนในช่วงระยะให้ความร้อนจนถึงระยะทำระเหย เพื่อศึกษาลักษณะเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน ได้แก่ อัตราการทำความร้อนแก่ชีวมวล โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยสมมติฐานของงานวิจัยนี้คาดว่าการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชั่นสามารถทำได้โดยการใช้ท่อชนิดเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านความร้อนและมีฟางข้าวและซังข้าวโพดเป็นชีวมวลในการทอรีแฟคชั่น กำหนดให้ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คืออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล ผลการวิจัยที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 ลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนและการประเมินความคลาดเคลื่อนของอัตราการให้ความร้อนโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

ลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจะประกอบด้วยขั้นตอนการให้ความร้อนสองช่วงคือการให้ความร้อนและการทำระเหย ในกรณีของฟางข้าวจะมีขั้นตอนการให้ความร้อนที่ชัดเจนสองช่วงและในกรณีของซังข้าวโพดจะมีขั้นตอนการให้ความร้อนสามช่วง ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นได้ชี้ให้เห็นว่าสาเหตุของลักษณะการให้ความร้อนของชีวมวลทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากลักษณะการระเหยน้ำที่แตกต่างกันนั่นเองและเราสามารถประเมินความคลาดเคลื่อนของอัตราการให้ความร้อนโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นพบว่าผลของการทำนายอัตราการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน Absolute average error และ Absolute bias error เท่ากับ ±8.98 % และ 1.38 % ตามลำดับ ทั้งนี้ ผลการทำนายจะขึ้นอยู่กับอัตราการระเหยน้ำของชีวมวลด้วย

5.2 ผลของความต้านทานความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล

ผลของความต้านทานร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล พบว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของความต้านทานความร้อนเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่าน้อยๆ (0.5 ถึง 3.0 K/W) และอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะลดลงอย่างช้าๆเป็นเชิงเส้นเมื่อความต้านทานความร้อนมีค่ามาก (3.5 ถึง 10.0 K/W) ทั้งฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย

5.3 ผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวล

ผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นพบว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้และมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้สูงสุดมากกว่าอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ต่ำสุด 2.62 เท่าและ 2.28 เท่าสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะอุ่นร้อนและมีค่า 4.25 เท่าและ 3.88 เท่าสำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดในระยะทำระเหยและอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ในระยะอุ่นร้อนมีค่า 0.015 min^{-1} และ 0.009 min^{-1} สำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ ในระยะทำระเหยมีค่า 0.010 min^{-1} และ 0.005 min^{-1} สำหรับฟางข้าวและซังข้าวโพดตามลำดับ

5.4 ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกที่มีต่ออัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น พบว่า ปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกในชีวมวลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นเชิงเส้นในระยะอุ่นร้อนและในระยะทำระเหย เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่าน้อยๆ (5 - 10 wt%) อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นแบบเปียกมีค่ามากๆ (10 - 30 wt%) อัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลมีค่าลดลงอย่างช้าๆ

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 การศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการระเหยน้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางความร้อนของเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายลักษณะการให้ความร้อนของเตาปฏิกรณ์ได้ค่อนข้างจะสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง แต่จะพบว่าการทำนายในช่วงทำระเหยยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากความขาดแคลนแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการระเหยน้ำออกจากชีวมวลเนื่องจากการจัดเรียงตัวของชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ที่ได้อธิบายเอาไว้ในหัวข้อ 4.1 จึงเป็นไปได้ว่า การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้สำหรับการจัดเรียงตัวของชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจึงควรเป็นประเด็นที่ควรดำเนินการศึกษาต่อไป

5.5.2 การศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนของระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการส่งผ่านความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นโดยอาศัยท่อเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า ท่อเทอร์โมไซฟอนสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีในช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่มีช่วงกว้างๆ แต่จะพบว่าจะใช้เวลาที่ค่อนข้างยาวนาน จึงเป็นไปได้ว่า ถ้ามีการติดตั้งครีบที่บริเวณของห้องเผาไหม้จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพองการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบได้

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายการอ้างอิง

1. Low, L.W., et al., *Carbonization of Elaeis guineensis frond fiber: Effect of heating rate and nitrogen gas flow rate for adsorbent properties enhancement.* Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. **28**: p. 37-44.
2. Rousset, P., et al., *Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction.* Bioresource Technology, 2011. **102**(17): p. 8225-8231.
3. Ratte, J., et al., *Mathematical modelling of a continuous biomass torrefaction reactor: TORSPYD™ column.* Biomass and Bioenergy, 2011. **35**(8): p. 3481-3495.
4. Medic, D., et al., *The Effects of Particle Size, Different Corn Stover Components, and Gas Residence Time on Torrefaction of Corn Stover.* Energies, 2012. **5**(4): p. 1199-1214.
5. Wang, M.J., et al., *Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues.* Energy, 2012. **37**(1): p. 177-184.
6. Huang, Y.F., et al., *Microwave torrefaction of rice straw and Pennisetum.* Bioresour Technol, 2012. **123**: p. 1-7.
7. Repellin, V., et al., *Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln.* Biomass and Bioenergy, 2010. **34**(5): p. 602-609.
8. Basu, P., *Torrefaction.* 2013: p. 87-145.
9. Wang, C., et al., *Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets.* Bioresource Technology, 2013. **127**(Supplement C): p. 318-325.
10. Rousset, P., et al., *Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012. **96**: p. 86-91.
11. Chen, W.-H., J. Peng, and X.T. Bi, *A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **44**: p. 847-866.
12. Chen, W.-H., et al., *Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass.* Energy, 2011.

36(5): p. 3012-3021.

13. *ECN*.
14. *www.intergal.com*.
15. Fertahi, S.e.-D., et al., *Performance optimization of a two-phase closed thermosyphon through CFD numerical simulations.* Applied Thermal Engineering, 2018. **128**: p. 551-563.
16. Tecchio, C., et al., *Thermal performance of thermosyphons in series connected by thermal plugs.* Experimental Thermal and Fluid Science, 2017. **88**: p. 409-422.
17. Chen, W.-H., et al., *Torrefaction operation and optimization of microalga residue for energy densification and utilization.* Applied Energy, 2015. **154**(Supplement C): p. 622-630.
18. สถาบันพลังงานญี่ปุ่น, คู่มือสารชีวมวลเอเชีย. 2008.
19. Chen, W.-H., et al., *Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass.* Applied Energy, 2014. **114**(Supplement C): p. 104-113.
20. Patrick C.A. Bergman, A.R.B., Jacob H.A. Kiel, *Torrefaction for entrained - flow gasification of biomass.* Unit ECN Biomass, 2004: p. 1-7.
21. Ratte, J., et al., *Mathematical modelling of slow pyrolysis of a particle of treated wood waste.* J Hazard Mater, 2009. **170**(2-3): p. 1023-40.
22. Huang, Y.-F., et al., *Leucaena biochar produced by microwave torrefaction: Fuel properties and energy efficiency.* Applied Energy, 2017. **204**: p. 1018-1025.
23. Wang, C., et al., *Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets.* Bioresour Technol, 2013. **127**: p. 318-25.
24. *www.parkautoclaveeng.com*.
25. *http://newearthcentre.org/eco-technology/*. 2012.
26. Nachenius, R.W., et al., *Torrefaction of pine in a bench-scale screw conveyor reactor.* Biomass and Bioenergy, 2015. **79**: p. 96-104.
27. Y.L. Ding a, b.,), R.N. Forster b,c, J.P.K. Seville a,b, D.J. Parker b,c, *Some aspects of heat transfer in rolling mode rotating drums operated at low to medium temperatures.* Powder Technology, 2001. **121**: p. 168–181.

28. Batidzirai, B., et al., *Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects.* Energy, 2013. **62**: p. 196-214.
29. *https://www.researchgate.net/figure/a-Screw-reactor-wwwsyncoalcom_283799284*. 2014.
30. *http://www.biolake.nl/*. 2015.
31. Li, H., et al., *Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor.* Bioresource Technology, 2012. **103**(1): p. 453-458.
32. Natarajan, P., D.V. Suriapparao, and R. Vinu, *Microwave torrefaction of Prosopis juliflora : Experimental and modeling study.* Fuel Processing Technology, 2018. **172**: p. 86-96.
33. Prins, M.J., K.J. Ptasinski, and F.J.J.G. Janssen, *Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2006. **77**(1): p. 35-40.
34. Joshi, Y., et al., *Torrefaction: Unit operation modelling and process simulation.* Applied Thermal Engineering, 2015. **74**: p. 83-88.
35. Bates, R.B. and A.F. Ghoniem, *Biomass torrefaction: modeling of reaction thermochemistry.* Bioresour Technol, 2013. **134**: p. 331-40.
36. Peduzzi, E., et al., *Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion processes.* Energy, 2014. **70**: p. 58-67.
37. Park, C., et al., *Effect of process operating conditions in the biomass torrefaction: A simulation study using one-dimensional reactor and process model.* Energy, 2015. **79**: p. 127-139.
38. Chen, D., M.L. , and a.X.Z. , *Drying Characteristics of Powdered Wheat Straw and Its Mathematical Modeling.* J. Agr. Sci. Tech., 2013. **15**: p. 869-877.
39. Dupont, C., et al., *Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues.* Fuel, 2014. **115**: p. 644-651.
40. Babler, M.U., et al., *Modeling and pilot plant runs of slow biomass pyrolysis in a rotary kiln.* Applied Energy, 2017. **207**: p. 123-133.
41. Danielewicz, J., et al., *Experimental and analytical performance investigation of air to air two phase closed thermosyphon based heat exchangers.* Energy, 2014. **77**(Supplement C): p. 82-87.

42. Cataldo, F. and J.R. Thome, *Experimental evaluation of the thermal performances of a thermosyphon cooling system rejecting heat by natural and forced convection.* Applied Thermal Engineering, 2017. **127**: p. 1404-1415.

43. *https://www.esdu.com/cgi-bin/ps.pl?sess=unlicensed_1180528092504mmt&t=doc&p=esdu_81038c*.

44. Chen, W.H., Z.Y. Wu, and J.S. Chang, *Isothermal and non-isothermal torrefaction characteristics and kinetics of microalga Scenedesmus obliquus CNW-N.* Bioresour Technol, 2014. **155**: p. 245-51.

45. Omoriyekomwan, J.E., et al., *Formation of hollow carbon nanofibers on bio-char during microwave pyrolysis of palm kernel shell.* Energy Conversion and Management, 2017. **148**: p. 583-592.

46. Sammy Sadaka1, Gagandeep S. Ubhi1 and Griffiths Atungulu2, *EFFECTS OF INITIAL MOISTURE CONTENT AND HEATING RATE ON WHEAT (OAKES) DRYING KINETIC PARAMETERS.* International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 2016: p. 42-54.

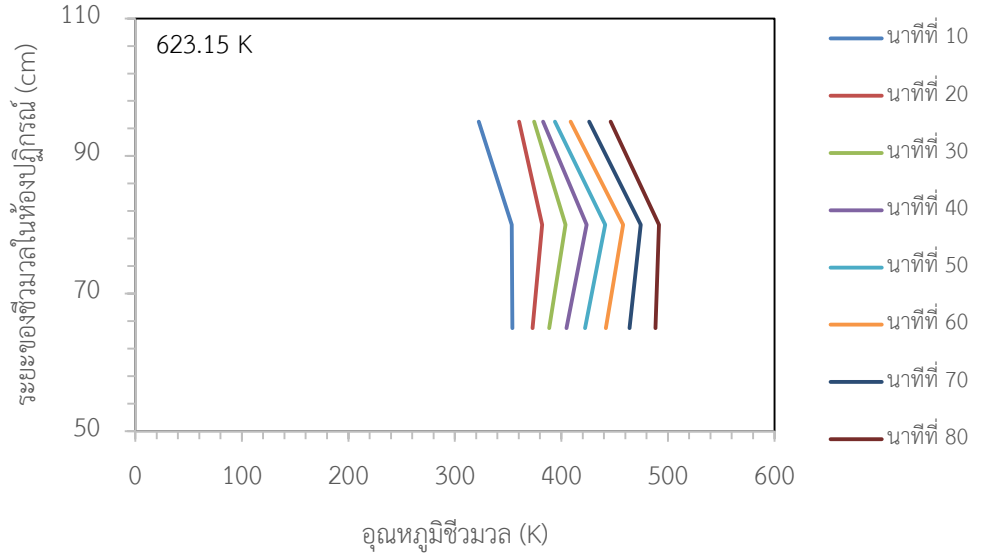
47. Varamaz, Y.K.a.M., *The effect of moisture content and air-drying on spontaneous combustion characteristics of two Turkish lignites.* 2003: p. 1685-1693

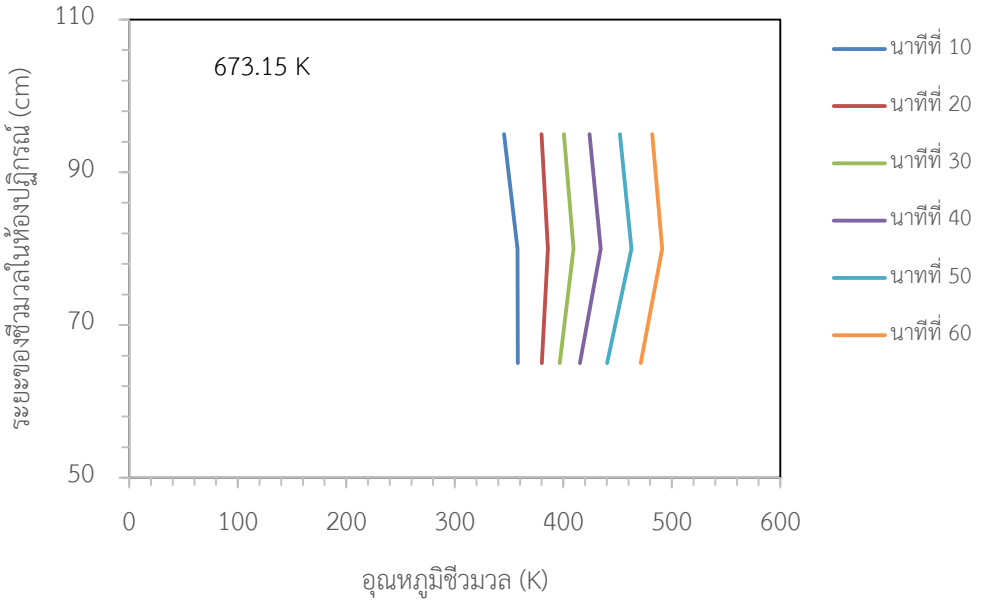
ภาคผนวก ก

ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอน

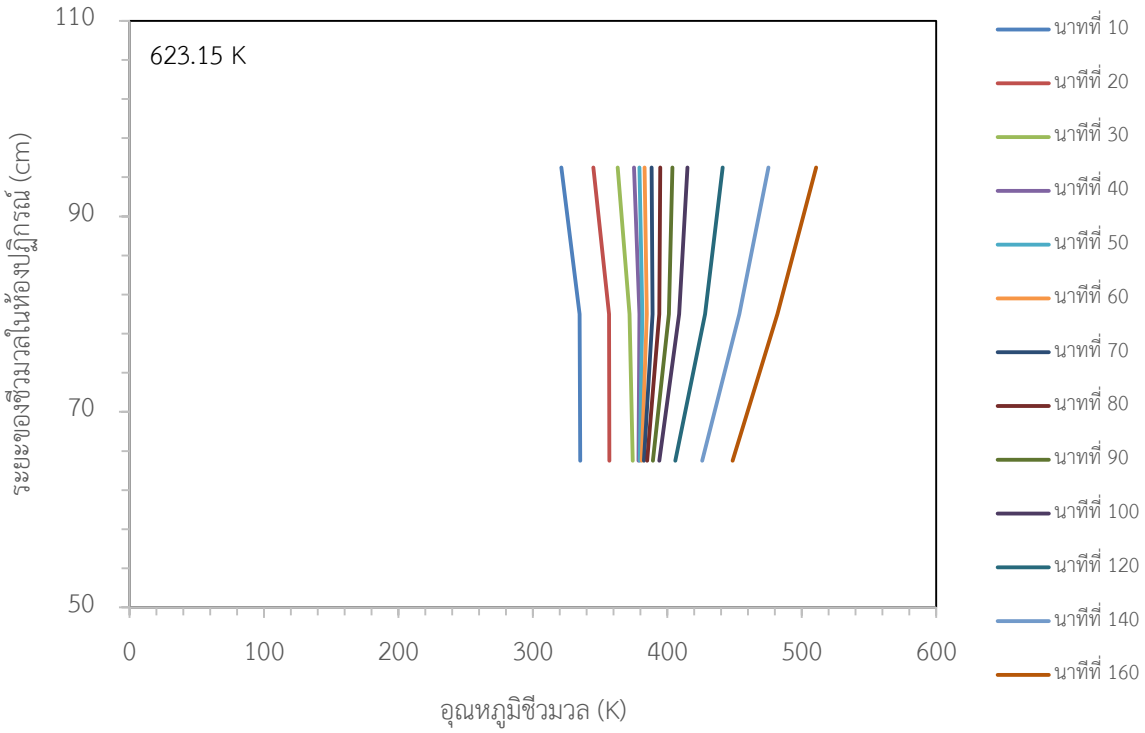
ก.1 ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิชีวมวล

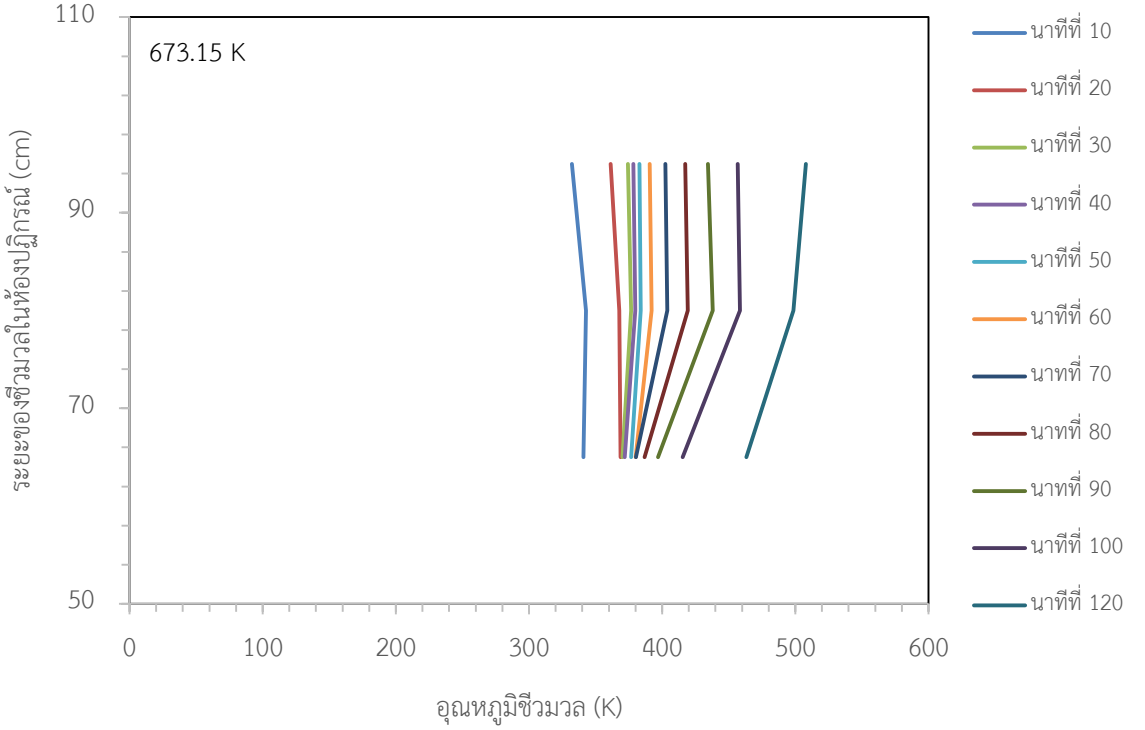
ภาพผนวกก. 1 และ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชีวมวลและระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 และ 673.15 K ของฟางข้าวและซังข้าวโพดที่เวลาใดๆในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหยตามลำดับ





ภาพผนวก ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชีวมวลและระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 และ 673.15 K ของฟางข้าว





ภาพผนวก ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชีวมวลและระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 และ 673.15 K ของซังข้าวโพด

จากรูปพบว่า ที่ระดับของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่ตำแหน่งจาก 65 ถึง 80 cm ในระยะอุ่นร้อนที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าลดลงจาก 354.08 K เป็น 353.38 K ที่นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และมีค่าลดลงจาก 335.10 K เป็น 334.63 K, 356.78 K เป็น 356.70 K และ 374.33 K เป็น 371.95 K ที่นาทีที่ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าลดลงจาก 358.05 K เป็น 357.80 K ที่นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 340.88 K เป็น 342.70 K ที่นาทีที่ 10 และมีค่าลดลงจาก 368.85 K เป็น 367.83 K ที่นาทีที่ 20 (ซังข้าวโพด) ในระยะทำระเหยที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 373.03 เป็น 381.83 K, 404.825 K เป็น 423.725 K, 441.9 K เป็น 457.9 K และ 488.275 K เป็น 491.775 K ที่นาทีที่ 20, 40, 60 และ 80 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 378.50 K เป็น 379.20 K, 384.95 K เป็น 393.98 K, 405.93 K เป็น 427.98 K และ 448.60 K เป็น 481.78 K ที่นาทีที่ 40, 80, 120 และ 160 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 380.18 K เป็น 385.78 K, 415.13 K เป็น 434.58 K และ 471.28 K เป็น 491.03 K ที่นาทีที่ 20, 40 และ 60 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 371.78 K เป็น 379.73 K, 386.90 K เป็น 419.25 K และ 463.28 K เป็น 498.55 K ที่นาทีที่ 40, 80 และ 120 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่ตำแหน่งจาก 65 ถึง 80 cm ในระยะอุ่นร้อนที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K มีค่า 2.14 cm/K นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และ 0.32, 0.20 และ 0.60 cm/K ที่นาทีที่ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่า 0.60 cm/K ที่นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และ 0.82 และ 0.14 cm/K ที่นาทีที่ 10 และ 20 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ในระยะทำระเหยที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K มีค่า 1.70, 0.79, 0.93 และ 4.28 cm/K ที่นาทีที่ 20, 40, 60 และ 80 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่า 0.21, 1.66, 0.68 และ 0.45 cm/K ที่นาทีที่ 40, 80, 120 และ 160 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่า 2.67, 0.77 และ 0.75 cm/K ที่นาทีที่ 20, 40 และ 60 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่า 1.88, 0.46 และ 0.42 cm/K ที่นาทีที่ 40, 80 และ 120 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่ระดับของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่ตำแหน่งจาก 80 ถึง 95 cm ในระยะอุ่นร้อน ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าลดลงจาก 353.38 K เป็น 322.42 K ที่นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และมีค่าลดลงจาก 334.62 K เป็น 321.12 K , 356.70 K เป็น 344.88 K และ 371.95 K เป็น 363.08 K ที่นาทีที่ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่

อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าลดลงจาก 357.80 K เป็น 345.43 K ที่นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และมีค่าลดลงจาก 342.7 K เป็น 332.15 K ที่นาทีที่ 10 และมีค่าลดลงจาก 367.83 K เป็น 361.43 ที่นาทีที่ 20 (ซังข้าวโพด) ในระยะทำระเหย ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าลดลงจาก 381.83 K เป็น 360.27 K, 423.72 K เป็น 382.90 K, 457.90 K เป็น 408.63 K และ 491.77 K เป็น 446.40 K ที่นาทีที่ 20, 40, 60 และ 80 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่าลดลงจาก 379.20 K เป็น 375.15 K ที่นาทีที่ 40 และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 393.975 K เป็น 394.7 K, 427.975 K เป็น 441.05 K และ 481.775 K เป็น 510.68 K ที่นาทีที่ 80, 120 และ 160 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K อุณหภูมิชีวมวลมีค่าลดลงจาก 385.77 K เป็น 379.88 K, 434.57 K เป็น 424.08 K และ 491.025 K เป็น 481.85 K ที่นาทีที่ 20, 40 และ 60 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่าลดลงจาก 379.72 K เป็น 378.38 K และ 419.25 K เป็น 417.23 K ที่นาทีที่ 40 และ 80 และมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 498.55 K เป็น 507.98 K ที่นาทีที่ 120 (ซังข้าวโพด) เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่ตำแหน่งจาก 80 ถึง 95 cm ในระยะอุ่นร้อน ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K มีค่า 0.48 cm/K นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และ 2.66, 5.61 และ 7.89 cm/K ที่นาทีที่ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่า 1.21 cm/K ที่นาทีที่ 10 (ฟางข้าว) และ 1.42 และ 2.34 cm/K ที่นาทีที่ 10 และ 20 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ในระยะทำระเหยที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K มีค่า 1.70, 0.79, 0.93 และ 4.28 cm/K ที่นาทีที่ 20, 40, 60 และ 80 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่า 0.69, 0.36, 0.30 และ 0.33 cm/K ที่นาทีที่ 40, 80, 120 และ 160 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K มีค่า 2.54, 1.48 และ 1.63 cm/K ที่นาทีที่ 20, 40 และ 60 ตามลำดับ (ฟางข้าว) และมีค่า 11.11, 7.41 และ 1.59 cm/K ที่นาทีที่ 40, 80 และ 120 ตามลำดับ (ซังข้าวโพด) จะเห็นได้ว่า ที่ระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น 65 – 80 cm ในระยะอุ่นร้อนอุณหภูมิชีวมวลจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น แต่ในระยะทำระเหยอุณหภูมิชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นและที่ระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น 80 – 95 cm อุณหภูมิชีวมวลจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นทั้งในระยะอุ่นร้อนและระยะทำระเหย (0 – 100 min) แต่ตั้งแต่ที่นาทีที่ 120 ขึ้นไปอุณหภูมิชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น ดังนั้น การกระจายตัวของอุณหภูมิชีวมวลภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นจะลดลงตามการเพิ่มขึ้น

ของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น (0 – 100 min) และจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น (>120 min)

ดังนั้น จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิชีวมวลภายในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น (0 – 100 min) และจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น (>120 min)

ตารางผนวกก1. อุณหภูมิชีวมวลและระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 และ 673.15 K ของฟางข้าวตามลำดับ

อุณหภูมิอากาศร้อน(K)	เวลา (min)	อุณหภูมิของชีวมวล(K)		
		95	80	65
623.15	10	322.425	353.375	354.075
	20	360.275	381.825	373.025
	30	374.425	403.875	388.45
	40	382.9	423.725	404.825
	50	393.85	441.025	422.125
	60	408.625	457.9	441.9
	70	426.2	474.65	464.1
	80	446.4	491.775	488.275
673.15	10	345.425	357.8	358.05
	20	379.875	385.775	380.175
	30	400.425	409.3	396.55
	40	424.075	434.575	415.125
	50	452.275	462.65	440.35
	60	481.85	491.025	471.275

ตารางผนวกก2. อุณหภูมิชีวมวลและระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 และ 673.15 K ของซังข้าวโพดตามลำดับ

อุณหภูมิอากาศร้อน(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิของชีวมวล(K)		
		95	80	65
623.15	10	321.125	334.625	335.1
	20	344.875	356.7	356.775
	30	363.075	371.95	374.325
	40	375.15	379.2	378.5
	50	379.2	381.475	379.475
	60	383.1	384.675	380.9
	70	388.35	388.95	382.7
	80	394.7	393.975	384.95
	90	403.875	401.05	389.325
	100	414.95	408.75	393.925
	120	441.05	427.975	405.925
	130	457.125	439.825	415.75
	140	475.225	453.6	425.925
	160	510.675	481.775	448.6

ตารางผนวกก2. อุณหภูมิชีวมวลและระยะของชีวมวลในห้องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 และ 673.15 K ของซังข้าวโพดตามลำดับ(ต่อ)

อุณหภูมิอากาศร้อน(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิของชีวมวล(K)		
		95	80	65
400	10	332.15	342.7	340.875
	20	361.425	367.825	368.85
	30	374.325	376.575	370.15
	40	378.375	379.725	371.775
	50	382.85	383.975	376.75
	60	390.625	392.175	379.95
	70	402.425	403.85	380.175
	80	417.225	419.25	386.9
	90	434.45	438.05	396.925
	100	456.65	458.5	415.325
	120	507.975	498.55	463.275

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ข

ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น

ข1. ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองในกรณีของฟางข้าว

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
0	309.1917	0.533333	310.95	1.066667	312.7917	1.6	314.7917
0.016667	309.2333	0.55	311.0667	1.083333	312.8667	1.616667	314.8333
0.033333	309.3167	0.566667	311.1333	1.1	312.925	1.633333	314.9417
0.05	309.3833	0.583333	311.15	1.116667	313.0083	1.65	315.0083
0.066667	309.4167	0.6	311.2167	1.133333	313.0833	1.666667	315.0667
0.083333	309.4583	0.616667	311.25	1.15	313.1583	1.683333	315.125
0.1	309.4917	0.633333	311.3	1.166667	313.2333	1.7	315.2
0.116667	309.55	0.65	311.3667	1.183333	313.3167	1.716667	315.2667
0.133333	309.6	0.666667	311.4333	1.2	313.35	1.733333	315.375
0.15	309.6667	0.683333	311.4917	1.216667	313.4083	1.75	315.45
0.166667	309.75	0.7	311.55	1.233333	313.4667	1.766667	315.525
0.183333	309.8417	0.716667	311.6083	1.25	313.5333	1.783333	315.5667
0.2	309.9	0.733333	311.6167	1.266667	313.6167	1.8	315.6583
0.216667	309.9667	0.75	311.675	1.283333	313.725	1.816667	315.7083
0.233333	310.025	0.766667	311.7333	1.3	313.7917	1.833333	315.775
0.25	310.0583	0.783333	311.8083	1.316667	313.825	1.85	315.85
0.266667	310.05	0.8	311.875	1.333333	313.8917	1.866667	315.9
0.283333	310.1167	0.816667	311.9667	1.35	313.95	1.883333	315.9833
0.3	310.1667	0.833333	312.0333	1.366667	313.9083	1.9	316.075
0.316667	310.225	0.85	312.0667	1.383333	313.9333	1.916667	316.1
0.333333	310.2667	0.866667	312.1333	1.4	314	1.933333	316.1333
0.35	310.3417	0.883333	312.2	1.416667	314.0417	1.95	316.2
0.366667	310.5167	0.9	312.2833	1.433333	314.1083	1.966667	316.2667
0.383333	310.55	0.916667	312.3583	1.45	314.1833	1.983333	316.3417
0.4	310.6	0.933333	312.4083	1.466667	314.225	2	316.425
0.416667	310.6583	0.95	312.4667	1.483333	314.2833	2.016667	316.525
0.433333	310.7083	0.966667	312.5083	1.5	314.3417	2.033333	316.575
0.45	310.6667	0.983333	312.5583	1.516667	314.425	2.05	316.65

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
2.133333	316.975	2.6	318.8917	3.116667	321.1333	3.633333	323.1333
2.15	317.0333	2.616667	318.925	3.183333	321.2083	3.65	323.1917
2.166667	317.0917	2.633333	318.9833	3.2	321.25	3.666667	323.175
2.183333	317.1333	2.65	319.0917	3.216667	321.3417	3.683333	323.25
2.2	317.225	2.666667	319.1667	3.233333	321.425	3.7	323.3
2.216667	317.2833	2.683333	319.2083	3.25	321.5167	3.716667	323.4
2.233333	317.3333	2.7	319.275	3.266667	321.5667	3.733333	323.4583
2.25	317.4	2.716667	319.3417	3.283333	321.6417	3.75	323.5167
2.266667	317.4583	2.733333	319.3917	3.3	321.7167	3.766667	323.6
2.283333	317.5083	2.75	319.3333	3.316667	321.775	3.783333	323.6667
2.3	317.5917	2.766667	319.4167	3.333333	321.8583	3.8	323.7583
2.316667	317.675	2.783333	319.5	3.35	321.9667	3.816667	323.8167
2.333333	317.7333	2.8	319.5667	3.366667	322	3.833333	323.875
2.35	317.7917	2.816667	319.6333	3.383333	322.075	3.85	324
2.366667	317.8667	2.833333	319.7083	3.4	322.1667	3.866667	324.0583
2.383333	317.9	2.85	319.7917	3.416667	322.2333	3.883333	324.1167
2.4	317.9833	2.866667	319.8917	3.433333	322.2667	3.9	324.175
2.416667	318.05	2.883333	319.9667	3.45	322.3417	3.916667	324.2417
2.433333	318.1167	2.9	320.025	3.466667	322.4083	3.933333	324.3417
2.45	318.2083	2.916667	320.1083	3.483333	322.5083	3.95	324.4333
2.466667	318.3083	2.933333	320.2833	3.5	322.575	3.966667	324.5
2.483333	318.3583	2.95	320.3417	3.516667	322.6667	3.983333	324.6
2.5	318.4417	2.966667	320.4	3.533333	322.7167	4	324.6667
2.516667	318.5333	2.983333	320.4667	3.55	322.775	4.016667	324.7167
2.533333	318.575	3	320.5333	3.566667	322.8417	4.033333	324.8083
2.55	318.65	3.016667	320.5667	3.583333	322.9167	4.05	324.8667
2.566667	318.7667	3.033333	320.6333	3.6	322.9917	4.066667	324.9583

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
4.1	325.06667	4.55	326.85	5	328.68333	5.45	330.70833
4.1166667	325.20833	4.5666667	326.9	5.0166667	328.76667	5.4666667	330.76667
4.1333333	325.24167	4.5833333	326.91667	5.0333333	328.9	5.4833333	330.85
4.15	325.31667	4.6	326.975	5.05	328.96667	5.5	330.925
4.1666667	325.33333	4.6166667	327.025	5.0666667	329.025	5.5166667	330.975
4.1833333	325.40833	4.6333333	327.075	5.0833333	329.125	5.5333333	331.05
4.2	325.48333	4.65	327.125	5.1	329.20833	5.55	331.125
4.2166667	325.51667	4.6666667	327.25833	5.1166667	329.29167	5.5666667	331.175
4.2333333	325.59167	4.6833333	327.33333	5.1333333	329.4	5.5833333	331.14167
4.25	325.68333	4.7	327.50833	5.15	329.46667	5.6	331.2
4.2666667	325.70833	4.7166667	327.55833	5.1666667	329.53333	5.6166667	331.25833
4.2833333	325.75	4.7333333	327.66667	5.1833333	329.6	5.6333333	331.325
4.3	325.74167	4.75	327.75	5.2	329.68333	5.65	331.39167
4.3166667	325.8	4.7666667	327.89167	5.2166667	329.60833	5.6666667	331.46667
4.3333333	325.88333	4.7833333	327.95	5.2333333	329.69167	5.6833333	331.5
4.35	326.19167	4.8	328.04167	5.25	329.75	5.7	331.575
4.3666667	326.26667	4.8166667	328.1	5.2666667	329.80833	5.7166667	331.63333
4.3833333	326.35	4.8333333	328.175	5.2833333	329.85833	5.7333333	331.69167
4.4	326.44167	4.85	328.18333	5.3	329.925	5.75	331.76667
4.4166667	326.51667	4.8666667	328.23333	5.3166667	329.98333	5.7666667	331.9
4.4333333	326.33333	4.8833333	328.28333	5.3333333	330.025	5.7833333	331.96667
4.45	326.44167	4.9	328.36667	5.35	330.11667	5.8	332.03333
4.4666667	326.51667	4.9166667	328.41667	5.3666667	330.225	5.8166667	332.1
4.4833333	326.575	4.9333333	328.46667	5.3833333	330.28333	5.8333333	332.175
4.5	326.65833	4.95	328.525	5.4	330.44167	5.85	332.20833
4.5166667	326.725	4.9666667	328.58333	5.4166667	330.54167	5.8666667	332.25

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
5.85	332.20833	6.3	334.00833	6.75	335.85833	7.2	337.55833
5.8666667	332.25	6.3166667	334.13333	6.7666667	335.93333	7.2166667	337.61667
5.8833333	332.30833	6.3333333	334.20833	6.7833333	335.975	7.2333333	337.7
5.9	332.39167	6.35	334.25	6.8	336.06667	7.25	337.76667
5.9166667	332.48333	6.3666667	334.33333	6.8166667	336.125	7.2666667	337.84167
5.9333333	332.54167	6.3833333	334.40833	6.8333333	336.175	7.2833333	337.90833
5.95	332.63333	6.4	334.475	6.85	336.25	7.3	337.975
5.9666667	332.7	6.4166667	334.50833	6.8666667	336.29167	7.3166667	338.01667
5.9833333	332.775	6.4333333	334.55	6.8833333	336.35833	7.3333333	338.125
6	332.85	6.45	334.63333	6.9	336.45	7.35	338.24167
6.0166667	332.91667	6.4666667	334.725	6.9166667	336.5	7.3666667	338.35833
6.0333333	332.95833	6.4833333	334.76667	6.9333333	336.6	7.3833333	338.35833
6.05	333.05833	6.5	334.81667	6.95	336.64167	7.4	338.35
6.0666667	333.10833	6.5166667	334.925	6.9666667	336.68333	7.4166667	338.45833
6.0833333	333.15833	6.5333333	334.95833	6.9833333	336.73333	7.4333333	338.525
6.1	333.225	6.55	335.025	7	336.80833	7.45	338.58333
6.1166667	333.275	6.5666667	335.1	7.0166667	336.88333	7.4666667	338.63333
6.1333333	333.30833	6.5833333	335.18333	7.0333333	336.93333	7.4833333	338.68333
6.15	333.35	6.6	335.30833	7.05	337.03333	7.5	338.73333
6.1666667	333.45833	6.6166667	335.375	7.0666667	337.06667	7.5166667	338.69167
6.1833333	333.54167	6.6333333	335.45	7.0833333	337.14167	7.5333333	338.78333
6.2	333.59167	6.65	335.51667	7.1	337.225	7.55	338.85
6.2166667	333.64167	6.6666667	335.59167	7.1166667	337.28333	7.5666667	338.925
6.2333333	333.73333	6.6833333	335.66667	7.1333333	337.29167	7.5833333	338.975
6.25	333.79167	6.7	335.725	7.15	337.325	7.6	339.06667
6.2666667	333.88333	6.7166667	335.775	7.1666667	337.4	7.6166667	339.125

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
7.65	339.26667	8.1	340.85833	8.55	342.5	9	344.2
7.6666667	339.35833	8.1166667	340.93333	8.5666667	342.56667	9.0166667	344.24167
7.6833333	339.44167	8.1333333	340.99167	8.5833333	342.63333	9.0333333	344.33333
7.7	339.525	8.15	341.05	8.6	342.70833	9.05	344.39167
7.7166667	339.59167	8.1666667	341.11667	8.6166667	342.71667	9.0666667	344.38333
7.7333333	339.65	8.1833333	341.2	8.6333333	342.76667	9.0833333	344.44167
7.75	339.70833	8.2	341.25	8.65	342.85	9.1	344.50833
7.7666667	339.775	8.2166667	341.29167	8.6666667	342.91667	9.1166667	344.56667
7.7833333	339.84167	8.2333333	341.35833	8.6833333	342.94167	9.1333333	344.63333
7.8	339.88333	8.25	341.525	8.7	343.00833	9.15	344.675
7.8166667	339.93333	8.2666667	341.55833	8.7166667	343.08333	9.1666667	344.8
7.8333333	339.99167	8.2833333	341.60833	8.7333333	343.15	9.1833333	344.825
7.85	340.04167	8.3	341.68333	8.75	343.2	9.2	344.9
7.8666667	340.09167	8.3166667	341.725	8.7666667	343.25	9.2166667	344.95833
7.8833333	340.13333	8.3333333	341.71667	8.7833333	343.31667	9.2333333	344.98333
7.9	340.21667	8.35	341.75	8.8	343.41667	9.25	345.04167
7.9166667	340.26667	8.3666667	341.80833	8.8166667	343.45833	9.2666667	345.1
7.9333333	340.33333	8.3833333	341.86667	8.8333333	343.5	9.2833333	345.13333
7.95	340.35833	8.4	341.91667	8.85	343.56667	9.3	345.225
7.9666667	340.48333	8.4166667	341.95833	8.8666667	343.66667	9.3166667	345.3
7.9833333	340.53333	8.4333333	342.09167	8.8833333	343.65833	9.3333333	345.31667
8	340.56667	8.45	342.125	8.9	343.74167	9.35	345.28333
8.0166667	340.65	8.4666667	342.175	8.9166667	343.84167	9.3666667	345.36667
8.0333333	340.74167	8.4833333	342.25	8.9333333	343.925	9.3833333	345.40833
8.05	340.78333	8.5	342.30833	8.95	343.96667	9.4	345.48333
8.0666667	340.75	8.5166667	342.35	8.9666667	344.05833	9.4166667	345.54167

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
9.45	345.6	9.9	347.2	10.35	348.55	10.8	349.925
9.4666667	345.675	9.9166667	347.26667	10.366667	348.60833	10.816667	349.93333
9.4833333	345.73333	9.9333333	347.325	10.383333	348.65	10.833333	350.01667
9.5	345.81667	9.95	347.36667	10.4	348.70833	10.85	350.05833
9.5166667	345.88333	9.9666667	347.41667	10.416667	348.75833	10.866667	350.11667
9.5333333	345.975	9.9833333	347.45833	10.433333	348.80833	10.883333	350.18333
9.55	346.04167	10	347.51667	10.45	348.8	10.9	350.21667
9.5666667	346.06667	10.016667	347.55	10.466667	348.85	10.916667	350.26667
9.5833333	346.13333	10.033333	347.60833	10.483333	348.90833	10.933333	350.33333
9.6	346.16667	10.05	347.65833	10.5	348.95833	10.95	350.39167
9.6166667	346.24167	10.066667	347.69167	10.516667	348.99167	10.966667	350.425
9.6333333	346.28333	10.083333	347.69167	10.533333	349.14167	10.983333	350.49167
9.65	346.33333	10.1	347.75	10.55	349.20833	11	350.55
9.6666667	346.39167	10.116667	347.81667	10.566667	349.25833	11.016667	350.58333
9.6833333	346.43333	10.133333	347.86667	10.583333	349.29167	11.033333	350.64167
9.7	346.5	10.15	347.93333	10.6	349.35	11.05	350.64167
9.7166667	346.59167	10.166667	347.975	10.616667	349.40833	11.066667	350.725
9.7333333	346.61667	10.183333	348.03333	10.633333	349.475	11.083333	350.65
9.75	346.69167	10.2	348.08333	10.65	349.50833	11.1	350.69167
9.7666667	346.725	10.216667	348.15	10.666667	349.56667	11.116667	350.75833
9.7833333	346.78333	10.233333	348.18333	10.683333	349.61667	11.133333	350.80833
9.8	346.84167	10.25	348.21667	10.7	349.65833	11.15	350.83333
9.8166667	346.88333	10.266667	348.30833	10.716667	349.65833	11.166667	350.88333
9.8333333	346.925	10.283333	348.34167	10.733333	349.70833	11.183333	350.975
9.85	346.98333	10.3	348.4	10.75	349.78333	11.2	351
9.8666667	347.04167	10.316667	348.43333	10.766667	349.81667	11.216667	351.075

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
11.25	351.15833	11.7	352.49167	12.15	353.69167	12.6	355.04167
11.266667	351.225	11.716667	352.56667	12.166667	353.75	12.616667	355.06667
11.283333	351.26667	11.733333	352.63333	12.183333	353.91667	12.633333	355.13333
11.3	351.3	11.75	352.65	12.2	353.975	12.65	355.20833
11.316667	351.34167	11.766667	352.71667	12.216667	354.00833	12.666667	355.25
11.333333	351.35	11.783333	352.75	12.233333	354.075	12.683333	355.325
11.35	351.41667	11.8	352.81667	12.25	354.13333	12.7	355.375
11.366667	351.45833	11.816667	352.79167	12.266667	354.18333	12.716667	355.4
11.383333	351.51667	11.833333	352.83333	12.283333	354.24167	12.733333	355.325
11.4	351.56667	11.85	352.86667	12.3	354.28333	12.75	355.35833
11.416667	351.61667	11.866667	352.90833	12.316667	354.30833	12.766667	355.35833
11.433333	351.675	11.883333	352.98333	12.333333	354.375	12.783333	355.325
11.45	351.75	11.9	353.04167	12.35	354.41667	12.8	355.38333
11.466667	351.8	11.916667	353.06667	12.366667	354.3	12.816667	355.475
11.483333	351.85	11.933333	353.1	12.383333	354.34167	12.833333	355.59167
11.5	351.9	11.95	353.14167	12.4	354.36667	12.85	355.63333
11.516667	351.925	11.966667	353.175	12.416667	354.425	12.866667	355.725
11.533333	351.975	11.983333	353.2	12.433333	354.45833	12.883333	355.75833
11.55	351.95	12	353.3	12.45	354.5	12.9	355.81667
11.566667	351.975	12.016667	353.35833	12.466667	354.53333	12.916667	355.80833
11.583333	352.04167	12.033333	353.4	12.483333	354.575	12.933333	355.84167
11.6	352.075	12.05	353.45833	12.5	354.60833	12.95	355.875
11.616667	352.15	12.066667	353.50833	12.516667	354.65	12.966667	355.9
11.633333	352.31667	12.083333	353.56667	12.533333	354.73333	12.983333	355.90833
11.65	352.35	12.1	353.55833	12.55	354.86667	13	356
11.666667	352.4	12.116667	353.61667	12.566667	354.90833	13.016667	356.05833

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
13.05	356.21667	13.5	357.4	13.95	358.6	14.4	359.58333
13.066667	356.275	13.516667	357.48333	13.966667	358.64167	14.416667	359.59167
13.083333	356.35	13.533333	357.48333	13.983333	358.7	14.433333	359.63333
13.1	356.33333	13.55	357.51667	14	358.73333	14.45	359.675
13.116667	356.375	13.566667	357.53333	14.016667	358.65833	14.466667	359.75
13.133333	356.40833	13.583333	357.55	14.033333	358.68333	14.483333	359.78333
13.15	356.46667	13.6	357.58333	14.05	358.71667	14.5	359.84167
13.166667	356.46667	13.616667	357.63333	14.066667	358.73333	14.516667	359.875
13.183333	356.45833	13.633333	357.7	14.083333	358.75833	14.533333	359.93333
13.2	356.525	13.65	357.825	14.1	358.79167	14.55	360.00833
13.216667	356.56667	13.666667	357.89167	14.116667	358.80833	14.566667	360.05833
13.233333	356.60833	13.683333	357.95833	14.133333	358.90833	14.583333	360.09167
13.25	356.68333	13.7	358	14.15	358.95833	14.6	360.14167
13.266667	356.75	13.716667	358.05	14.166667	359.00833	14.616667	360.19167
13.283333	356.85	13.733333	358.08333	14.183333	359.05	14.633333	360.225
13.3	356.89167	13.75	358.10833	14.2	359.275	14.65	360.28333
13.316667	356.93333	13.766667	358.14167	14.216667	359.30833	14.666667	360.39167
13.333333	356.99167	13.783333	358.16667	14.233333	359.375	14.683333	360.40833
13.35	357.01667	13.8	358.19167	14.25	359.425	14.7	360.45
13.366667	357.01667	13.816667	358.20833	14.266667	359.325	14.716667	360.48333
13.383333	356.975	13.833333	358.26667	14.283333	359.35833	14.733333	360.54167
13.4	357.03333	13.85	358.28333	14.3	359.40833	14.75	360.40833
13.416667	357.06667	13.866667	358.33333	14.316667	359.44167	14.766667	360.44167
13.433333	357.14167	13.883333	358.39167	14.333333	359.49167	14.783333	360.49167
13.45	357.16667	13.9	358.43333	14.35	359.525	14.8	360.55
13.466667	357.29167	13.916667	358.51667	14.366667	359.53333	14.816667	360.56667

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
14.85	360.71667	15.3	361.90833	15.75	362.925	16.2	364.125
14.866667	360.74167	15.316667	361.91667	15.766667	363.075	16.216667	364.06667
14.883333	360.76667	15.333333	361.94167	15.783333	363.09167	16.233333	364.11667
14.9	360.825	15.35	362.01667	15.8	363.11667	16.25	364.16667
14.916667	360.85833	15.366667	362.05	15.816667	363.15	16.266667	364.225
14.933333	360.90833	15.383333	362.08333	15.833333	363.20833	16.283333	364.23333
14.95	360.95	15.4	362.175	15.85	363.2	16.3	364.29167
14.966667	361.01667	15.416667	362.21667	15.866667	363.225	16.316667	364.38333
14.983333	361.03333	15.433333	362.25	15.883333	363.26667	16.333333	364.41667
15	361.05833	15.45	362.29167	15.9	363.30833	16.35	364.44167
15.016667	361.09167	15.466667	362.34167	15.916667	363.36667	16.366667	364.46667
15.033333	361.14167	15.483333	362.26667	15.933333	363.425	16.383333	364.53333
15.05	361.2	15.5	362.30833	15.95	363.49167	16.4	364.45
15.066667	361.23333	15.516667	362.36667	15.966667	363.53333	16.416667	364.5
15.083333	361.275	15.533333	362.38333	15.983333	363.55	16.433333	364.55
15.1	361.3	15.55	362.425	16	363.6	16.45	364.56667
15.116667	361.35	15.566667	362.475	16.016667	363.625	16.466667	364.59167
15.133333	361.41667	15.583333	362.55	16.033333	363.625	16.483333	364.65833
15.15	361.44167	15.6	362.58333	16.05	363.7	16.5	364.725
15.166667	361.5	15.616667	362.625	16.066667	363.70833	16.516667	364.76667
15.183333	361.58333	15.633333	362.66667	16.083333	363.75833	16.533333	364.8
15.2	361.6	15.65	362.69167	16.1	363.80833	16.55	364.825
15.216667	361.66667	15.666667	362.68333	16.116667	363.83333	16.566667	364.875
15.233333	361.73333	15.683333	362.71667	16.133333	363.95833	16.583333	364.96667
15.25	361.76667	15.7	362.775	16.15	364.00833	16.6	364.98333
15.266667	361.78333	15.716667	362.84167	16.166667	364.06667	16.616667	365.03333

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
16.65	365.11667	17.1	366.3	17.55	367.21667	18	368.30833
16.666667	365.15	17.116667	366.33333	17.566667	367.24167	18.016667	368.39167
16.683333	365.15833	17.133333	366.33333	17.583333	367.25833	18.033333	368.41667
16.7	365.18333	17.15	366.36667	17.6	367.34167	18.05	368.51667
16.716667	365.23333	17.166667	366.39167	17.616667	367.38333	18.066667	368.53333
16.733333	365.24167	17.183333	366.44167	17.633333	367.40833	18.083333	368.55833
16.75	365.29167	17.2	366.46667	17.65	367.41667	18.1	368.56667
16.766667	365.43333	17.216667	366.48333	17.666667	367.46667	18.116667	368.625
16.783333	365.5	17.233333	366.55833	17.683333	367.50833	18.133333	368.63333
16.8	365.54167	17.25	366.6	17.7	367.525	18.15	368.625
16.816667	365.56667	17.266667	366.60833	17.716667	367.59167	18.166667	368.65
16.833333	365.6	17.283333	366.65	17.733333	367.61667	18.183333	368.68333
16.85	365.675	17.3	366.68333	17.75	367.68333	18.2	368.725
16.866667	365.68333	17.316667	366.65833	17.766667	367.70833	18.216667	368.76667
16.883333	365.69167	17.333333	366.7	17.783333	367.70833	18.233333	368.8
16.9	365.73333	17.35	366.71667	17.8	367.74167	18.25	368.85
16.916667	365.80833	17.366667	366.8	17.816667	367.78333	18.266667	368.90833
16.933333	365.83333	17.383333	366.84167	17.833333	367.85833	18.283333	368.93333
16.95	365.88333	17.4	366.90833	17.85	367.875	18.3	368.975
16.966667	365.93333	17.416667	366.925	17.866667	367.89167	18.316667	369.00833
16.983333	365.95833	17.433333	366.98333	17.883333	367.94167	18.333333	369.08333
17	366.01667	17.45	367.00833	17.9	367.98333	18.35	369.1
17.016667	366.05	17.466667	367.04167	17.916667	368.08333	18.366667	369.13333
17.033333	366.1	17.483333	367.09167	17.933333	368.11667	18.383333	369.19167
17.05	366.175	17.5	367.11667	17.95	368.16667	18.4	369.21667
17.066667	366.20833	17.516667	367.18333	17.966667	368.25833	18.416667	369.26667

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
18.45	369.29167	18.916667	370.175	19.366667	369.73333	19.816667	370.60833
18.466667	369.33333	18.933333	370.225	19.383333	369.75833	19.833333	370.625
18.483333	369.35833	18.95	370.24167	19.4	369.8	19.85	370.63333
18.5	369.38333	18.966667	370.35	19.416667	369.825	19.866667	370.66667
18.516667	369.40833	18.983333	370.35833	19.433333	369.9	19.883333	370.65833
18.533333	369.45	19	370.44167	19.45	369.925	19.9	370.7
18.55	369.45833	19.016667	370.48333	19.466667	369.975	19.916667	370.73333
18.566667	369.51667	19.033333	370.50833	19.483333	369.95833	19.933333	370.76667
18.583333	369.55833	19.05	370.55	19.5	369.99167	19.95	370.80833
18.6	369.60833	19.066667	369.35833	19.516667	370.1	19.966667	370.83333
18.616667	369.65	19.083333	369.36667	19.533333	370.125	19.983333	370.89167
18.633333	369.69167	19.1	369.39167	19.55	370.125	20	370.90833
18.65	369.74167	19.116667	369.39167	19.566667	370.13333	20.016667	370.925
18.666667	369.78333	19.133333	369.40833	19.583333	370.15	20.033333	370.98333
18.683333	369.825	19.15	369.44167	19.6	370.175	20.05	371
18.7	369.84167	19.166667	369.44167	19.616667	370.13333	20.066667	371.00833
18.716667	369.875	19.183333	369.5	19.633333	370.175	20.083333	371.025
18.733333	369.90833	19.2	369.525	19.65	370.21667	20.1	371.04167
18.75	369.90833	19.216667	369.475	19.666667	370.28333	20.116667	371.05833
18.766667	369.93333	19.233333	369.50833	19.683333	370.325	20.133333	371.10833
18.783333	369.96667	19.25	369.48333	19.7	370.35	20.15	371.11667
18.8	370	19.266667	369.46667	19.716667	370.4	20.166667	371.15833
18.816667	370.025	19.283333	369.51667	19.733333	370.41667	20.183333	371.175
18.833333	370.025	19.3	369.56667	19.75	370.45	20.2	371.19167
18.85	370.04167	19.316667	369.625	19.766667	370.475	20.216667	371.225
18.866667	370.08333	19.333333	369.65833	19.783333	370.48333	20.233333	371.26667

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
20.266667	371.38333	20.716667	372.225	21.166667	372.925	21.616667	373.75
20.283333	371.4	20.733333	372.25	21.183333	372.975	21.633333	373.725
20.3	371.44167	20.75	372.28333	21.2	373	21.65	373.75
20.316667	371.45833	20.766667	372.31667	21.216667	373.01667	21.666667	373.775
20.333333	371.475	20.783333	372.34167	21.233333	373.05	21.683333	373.79167
20.35	371.46667	20.8	372.325	21.25	373.05833	21.7	373.83333
20.366667	371.48333	20.816667	372.34167	21.266667	373.05	21.716667	373.84167
20.383333	371.50833	20.833333	372.35833	21.283333	373.06667	21.733333	373.875
20.4	371.54167	20.85	372.39167	21.3	373.13333	21.75	373.88333
20.416667	371.58333	20.866667	372.44167	21.316667	373.14167	21.766667	373.925
20.433333	371.6	20.883333	372.46667	21.333333	373.21667	21.783333	373.93333
20.45	371.65	20.9	372.55	21.35	373.225	21.8	373.975
20.466667	371.66667	20.916667	372.58333	21.366667	373.25833	21.816667	374
20.483333	371.69167	20.933333	372.60833	21.383333	373.275	21.833333	374.05
20.5	371.71667	20.95	372.625	21.4	373.29167	21.85	374.075
20.516667	371.76667	20.966667	372.63333	21.416667	373.35	21.866667	374.1
20.533333	371.81667	20.983333	372.61667	21.433333	373.375	21.883333	374.15833
20.55	371.85	21	372.64167	21.45	373.35833	21.9	374.28333
20.566667	371.875	21.016667	372.68333	21.466667	373.41667	21.916667	374.29167
20.583333	371.90833	21.033333	372.69167	21.483333	373.43333	21.933333	374.33333
20.6	371.93333	21.05	372.70833	21.5	373.49167	21.95	374.4
20.616667	371.91667	21.066667	372.73333	21.516667	373.50833	21.966667	374.45
20.633333	371.93333	21.083333	372.8	21.533333	373.575	21.983333	374.46667
20.65	371.95833	21.1	372.84167	21.55	373.6	22	374.48333
20.666667	372.04167	21.116667	372.88333	21.566667	373.65	22.016667	374.51667
20.683333	372.075	21.133333	372.88333	21.583333	373.69167	22.033333	374.525

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
22.066667	374.59167	22.516667	375.35	22.966667	376.06667	23.416667	376.88333
22.083333	374.575	22.533333	375.39167	22.983333	376.075	23.433333	376.89167
22.1	374.60833	22.55	375.45	23	376.1	23.45	376.90833
22.116667	374.64167	22.566667	375.5	23.016667	376.125	23.466667	376.93333
22.133333	374.68333	22.583333	375.49167	23.033333	376.13333	23.483333	376.975
22.15	374.70833	22.6	375.50833	23.05	376.18333	23.5	376.99167
22.166667	374.725	22.616667	375.55	23.066667	376.21667	23.516667	377
22.183333	374.74167	22.633333	375.53333	23.083333	376.25	23.533333	377.05
22.2	374.74167	22.65	375.55833	23.1	376.29167	23.55	377.05833
22.216667	374.75833	22.666667	375.575	23.116667	376.31667	23.566667	377.125
22.233333	374.78333	22.683333	375.6	23.133333	376.34167	23.583333	377.15
22.25	374.8	22.7	375.61667	23.15	376.36667	23.6	377.16667
22.266667	374.86667	22.716667	375.65	23.166667	376.41667	23.616667	377.18333
22.283333	374.9	22.733333	375.68333	23.183333	376.44167	23.633333	377.225
22.3	374.91667	22.75	375.7	23.2	376.475	23.65	377.29167
22.316667	374.96667	22.766667	375.725	23.216667	376.525	23.666667	377.34167
22.333333	374.99167	22.783333	375.75833	23.233333	376.575	23.683333	377.35833
22.35	375.03333	22.8	375.76667	23.25	376.58333	23.7	377.39167
22.366667	375.05833	22.816667	375.79167	23.266667	376.61667	23.716667	377.425
22.383333	375.13333	22.833333	375.83333	23.283333	376.61667	23.733333	377.44167
22.4	375.14167	22.85	375.875	23.3	376.63333	23.75	377.50833
22.416667	375.2	22.866667	375.9	23.316667	376.65	23.766667	377.525
22.433333	375.23333	22.883333	375.90833	23.333333	376.675	23.783333	377.55833
22.45	375.225	22.9	375.94167	23.35	376.69167	23.8	378.45833
22.466667	375.23333	22.916667	375.95833	23.366667	376.79167	23.816667	378.5
22.483333	375.26667	22.933333	375.98333	23.383333	376.825	23.833333	378.50833

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
23.866667	378.6	24.316667	379.25833	24.766667	379.41667	25.216667	380.2
23.883333	378.60833	24.333333	378.775	24.783333	379.425	25.233333	380.225
23.9	378.625	24.35	378.675	24.8	379.45833	25.25	380.24167
23.916667	378.65	24.366667	378.73333	24.816667	379.48333	25.266667	380.23333
23.933333	378.675	24.383333	378.875	24.833333	379.56667	25.283333	380.24167
23.95	378.7	24.4	378.89167	24.85	379.58333	25.3	380.25
23.966667	378.74167	24.416667	378.91667	24.866667	379.6	25.316667	380.3
23.983333	378.775	24.433333	378.95833	24.883333	379.64167	25.333333	380.3
24	378.80833	24.45	378.98333	24.9	379.66667	25.35	380.34167
24.016667	378.88333	24.466667	378.925	24.916667	379.7	25.366667	380.35833
24.033333	378.90833	24.483333	378.95	24.933333	379.74167	25.383333	380.475
24.05	378.91667	24.5	378.98333	24.95	379.8	25.4	380.48333
24.066667	378.96667	24.516667	379.00833	24.966667	379.83333	25.416667	380.50833
24.083333	378.99167	24.533333	379.04167	24.983333	379.86667	25.433333	380.54167
24.1	378.95833	24.55	379.09167	25	379.88333	25.45	380.575
24.116667	379	24.566667	379.1	25.016667	379.9	25.466667	380.60833
24.133333	379.025	24.583333	379.125	25.033333	379.94167	25.483333	380.65833
24.15	379.06667	24.6	379.15	25.05	379.96667	25.5	380.69167
24.166667	379.075	24.616667	379.16667	25.066667	379.99167	25.516667	380.75
24.183333	379.1	24.633333	379.19167	25.083333	380.025	25.533333	380.775
24.2	379.225	24.65	379.28333	25.1	380.05833	25.55	380.80833
24.216667	379.24167	24.666667	379.31667	25.116667	380.075	25.566667	380.85
24.233333	379.20833	24.683333	379.34167	25.133333	380.10833	25.583333	380.875
24.25	379.29167	24.7	379.35	25.15	380.13333	25.6	380.925
24.266667	379.325	24.716667	379.39167	25.166667	380.15833	25.616667	380.93333
24.283333	379.19167	24.733333	379.40833	25.183333	380.20833	25.633333	380.95833

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
25.666667	381.025	26.116667	381.69167	26.566667	382.55833	27.016667	383.28333
25.683333	381.06667	26.133333	381.74167	26.583333	382.5	27.033333	383.275
25.7	381.1	26.15	381.76667	26.6	382.525	27.05	383.30833
25.716667	381.13333	26.166667	381.8	26.616667	382.53333	27.066667	383.35
25.733333	381.15833	26.183333	381.825	26.633333	382.6	27.083333	383.35833
25.75	381.125	26.2	381.85833	26.65	382.625	27.1	383.41667
25.766667	381.14167	26.216667	381.88333	26.666667	382.66667	27.116667	383.475
25.783333	381.175	26.233333	381.9	26.683333	382.68333	27.133333	383.49167
25.8	381.2	26.25	381.93333	26.7	382.725	27.15	383.51667
25.816667	381.21667	26.266667	381.95833	26.716667	382.75	27.166667	383.55
25.833333	381.25	26.283333	382.00833	26.733333	382.79167	27.183333	383.575
25.85	381.31667	26.3	382.01667	26.75	382.85	27.2	383.6
25.866667	381.35833	26.316667	382.05	26.766667	382.9	27.216667	383.55833
25.883333	381.38333	26.333333	382.09167	26.783333	382.93333	27.233333	383.6
25.9	381.40833	26.35	382.10833	26.8	382.96667	27.25	383.625
25.916667	381.44167	26.366667	382.14167	26.816667	382.98333	27.266667	383.69167
25.933333	381.35	26.383333	382.19167	26.833333	383.025	27.283333	383.70833
25.95	381.375	26.4	382.325	26.85	383.025	27.3	383.75
25.966667	381.40833	26.416667	382.34167	26.866667	383.05833	27.316667	383.86667
25.983333	381.43333	26.433333	382.35833	26.883333	383.05833	27.333333	383.89167
26	381.46667	26.45	382.38333	26.9	383.09167	27.35	383.925
26.016667	381.49167	26.466667	382.39167	26.916667	383.11667	27.366667	383.93333
26.033333	381.575	26.483333	382.425	26.933333	383.13333	27.383333	383.95
26.05	381.6	26.5	382.475	26.95	383.175	27.4	383.95
26.066667	381.61667	26.516667	382.475	26.966667	383.21667	27.416667	383.95
26.083333	381.65	26.533333	382.50833	26.983333	383.24167	27.433333	383.96667

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
27.466667	384	27.916667	384.825	28.366667	385.58333	28.816667	386.43333
27.483333	384.05833	27.933333	384.875	28.383333	385.625	28.833333	386.45
27.5	384.13333	27.95	384.89167	28.4	385.64167	28.85	386.45
27.516667	384.15833	27.966667	384.91667	28.416667	385.58333	28.866667	386.49167
27.533333	384.19167	27.983333	384.975	28.433333	385.625	28.883333	386.54167
27.55	384.2	28	385	28.45	385.65833	28.9	386.59167
27.566667	384.225	28.016667	385.025	28.466667	385.71667	28.916667	386.60833
27.583333	384.275	28.033333	385.05833	28.483333	385.75833	28.933333	386.64167
27.6	384.29167	28.05	385.13333	28.5	385.775	28.95	386.66667
27.616667	384.31667	28.066667	385.15	28.516667	385.79167	28.966667	386.75
27.633333	384.34167	28.083333	385.18333	28.533333	385.81667	28.983333	386.76667
27.65	384.36667	28.1	385.20833	28.55	385.89167	29	386.80833
27.666667	384.35833	28.116667	385.23333	28.566667	385.93333	30	389.73333
27.683333	384.325	28.133333	385.21667	28.583333	385.95833	31	391.18333
27.7	384.35	28.15	385.24167	28.6	386.09167	32	392.89167
27.716667	384.38333	28.166667	385.25833	28.616667	386.10833	33	394.6
27.733333	384.41667	28.183333	385.25833	28.633333	386.11667	34	395.7
27.75	384.43333	28.2	385.31667	28.65	386.16667	35	397.44167
27.766667	384.53333	28.216667	385.325	28.666667	386.18333	36	399.075
27.783333	384.58333	28.233333	385.4	28.683333	386.15833	37	400.80833
27.8	384.61667	28.25	385.40833	28.7	386.175	38	402.54167
27.816667	384.65	28.266667	385.425	28.716667	386.2	39	404.29167
27.833333	384.68333	28.283333	385.46667	28.733333	386.225	40	406.19167
27.85	384.71667	28.3	385.49167	28.75	386.26667	41	407.93333
27.866667	384.75	28.316667	385.51667	28.766667	386.26667	42	409.69167
27.883333	384.78333	28.333333	385.53333	28.783333	386.35	43	411.51667

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
44	413.325	52	427.75	53	429.675	66	455.70833
45	415.03333	52.016667	427.78333	54	431.61667	67	457.65
46	416.91667	52.033333	427.80833	55	433.55	68	459.675
47	420.10833	52.05	427.83333	56	435.48333	69	461.50833
48	420.89167	52.066667	427.875	57	437.50833	70	463.425
49	422.83333	52.083333	427.90833	58	439.39167	71	465.25
50	423.9	52.1	427.95	59	441.35	72	467.4
51	425.81667	52.116667	427.98333	60	443.34167	73	469.40833
51.016667	425.88333	52.133333	428.025	61	445.34167	74	471.25833
51.033333	425.90833	52.15	428.04167	62	447.28333	75	473.34167
51.05	425.99167	52.166667	428.08333	63	449.35	76	475.19167
51.066667	426.03333	52.183333	428.10833	64	451.38333	77	477.125
51.083333	426.09167	52.2	428.15	65	453.8	77.866667	478.825
51.1	426.14167	52.216667	428.2	65.016667	453.83333	77.883333	478.85
51.116667	426.175	52.233333	428.23333	65.033333	453.85	77.9	478.89167
51.133333	426.20833	52.25	428.2	65.05	453.89167	77.916667	478.925
51.15	426.30833	52.266667	428.26667	65.066667	453.94167	77.933333	478.96667
51.166667	426.325	52.283333	428.29167	65.083333	454.08333	77.95	478.98333
51.183333	426.375	52.3	428.33333	65.1	454.125	77.966667	479.00833
51.2	426.40833	52.316667	428.36667	65.116667	454.14167	77.983333	479.05833
51.216667	426.45	52.333333	428.40833	65.133333	454.15	78	479.10833
51.233333	426.275	52.35	428.4	65.15	454.19167	78.016667	479.15833
51.25	426.275	52.366667	428.45833	65.166667	454.15	78.033333	479.18333
51.266667	426.28333	52.383333	428.53333	65.183333	454.175	78.05	479.19167
51.283333	426.31667	52.4	428.54167	65.2	454.25833	78.066667	479.21667
51.3	426.34167	52.416667	428.575	65.216667	454.2	78.083333	479.25833

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
79	481.00833	82	486.575	83.066667	488.66667	84.616667	491.89167
79.016667	481.09167	82.016667	486.61667	83.083333	488.73333	84.633333	491.925
79.033333	481.10833	82.033333	486.75	83.1	488.775	84.65	491.98333
79.05	481.125	82.05	486.79167	83.116667	488.8	84.666667	492.00833
79.066667	481.16667	82.066667	486.80833	83.133333	488.83333	84.683333	492.05833
79.083333	481.21667	82.083333	486.85	83.15	488.88333	84.7	492.025
79.1	481.175	82.1	486.875	83.166667	488.925	84.716667	492.075
79.116667	481.225	82.116667	486.90833	83.183333	488.95833	84.733333	492.1
79.133333	481.25	82.133333	486.89167	83.2	488.98333	84.75	492.13333
79.15	481.3	82.15	486.93333	83.216667	489.025	84.766667	492.19167
79.166667	481.30833	82.166667	486.98333	83.233333	489.08333	84.783333	492.21667
79.183333	481.34167	82.183333	487.01667	83.25	489.125	84.8	492.24167
80	482.975	82.2	487.05	84	490.41667	84.816667	492.26667
80.016667	482.99167	82.216667	487.13333	84.016667	490.41667	84.833333	492.31667
80.033333	483.025	82.233333	487.175	84.033333	490.49167	84.85	492.35
80.05	483.05833	82.25	487.225	84.05	490.48333	84.866667	492.38333
80.066667	483.08333	82.266667	487.24167	84.066667	490.50833	84.883333	492.5
80.083333	483.11667	82.283333	487.31667	84.083333	490.55833	84.9	492.53333
80.1	483.16667	82.3	487.33333	84.1	490.6	84.916667	492.56667
81	484.85	82.316667	487.35	84.116667	490.625	84.933333	492.59167
81.016667	484.89167	82.333333	487.39167	84.133333	490.68333	84.95	492.64167
81.033333	484.85	82.35	487.425	84.15	494.1	84.966667	492.58333
81.05	484.93333	83	488.6	84.166667	494.13333	84.983333	492.59167
81.066667	484.96667	83.016667	488.63333	84.183333	494.15833	85	492.61667
81.083333	485.025	83.033333	488.64167	84.2	494.19167	85.016667	492.65
81.1	485.05833	83.05	488.64167	84.216667	492.41667	85.033333	492.675

ตารางผนวกข.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
85.066667	492.73333
85.083333	492.75833
85.1	492.79167
85.116667	492.80833
85.133333	492.86667
85.15	492.89167
85.166667	492.90833
85.183333	492.94167
85.2	492.95833
85.216667	492.99167
85.233333	493
85.25	493.075
85.266667	493.11667
85.283333	493.10833
85.3	493.11667
85.316667	493.16667

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางผนวกข2. ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 648.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.15	23	382.7417	46	428.8667	69	486.5833
1	312.175	24	384.6833	47	431.275	70	489.1833
2	315.6833	25	386.5083	48	433.6667	71	491.7667
3	319.6667	26	388.5167	49	436.05	71.53333	493.15
4	323.9083	27	390.3083	50	438.5417		
5	328.175	28	392.2417	51	439.425		
6	332.475	29	394.075	52	442.1		
7	336.6833	30	395.9167	53	444.5333		
8	340.8667	31	397.6083	54	447.0167		
9	344.975	32	399.5833	55	449.4833		
10	348.875	33	401.4333	56	452.0167		
11	352.5917	34	403.05	57	454.5667		
12	356.225	35	404.825	58	456.0083		
13	359.725	36	406.7167	59	458.6		
14	362.9667	37	409.1083	60	461.6667		
15	365.9417	38	411.1833	61	465.35		
16	368.6	39	412.1	62	467.8		
17	370.9167	40	415.425	63	471.2917		
18	373.05	41	416.8667	64	473.825		
19	375.0917	42	419.025	65	476.4833		
20	377.0083	43	421.9583	66	478.7917		
21	378.95	44	424.2917	67	481.55		
22	380.9333	45	426.5833	68	484.075		

ตารางผนวกข4. ผลที่ได้จากผลการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.225	23	388.1167	46	440.45
1	312.7167	24	390.05	47	443.325
2	317.0917	25	391.95	48	446.1083
3	321.8083	26	394.0083	49	449.025
4	326.8333	27	396.0583	50	451.7583
5	331.7583	28	398.0083	51	454.6583
6	336.6333	29	400.0083	52	457.5417
7	341.325	30	402.0917	53	460.4667
8	345.8417	31	404.0333	54	463.5
9	349.9833	32	406.1917	55	466.5083
10	353.7583	33	408.2917	56	469.3667
11	357.4833	34	410.375	57	472.4583
12	361.0667	35	412.75	58	475.325
13	364.2167	36	414.7917	59	478.5083
14	367.275	37	417.225	60	481.3833
15	370.2667	38	419.5833	61	484.4333
16	372.7417	39	421.9667	62	487.5583
17	375.325	40	424.5917	63	490.4417
18	377.6917	41	427.0167	63.91667	493.15
19	379.7833	42	429.625		
20	381.9417	43	432.225		
21	383.9917	44	435.0833		
22	386.1	45	437.625		

ตารางผนวกข.3 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 698.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.2318	22	393.0136	44	471.05
1	313.5227	23	395.7864	45	474.8591
2	318.3409	24	398.6682	46	478.7136
3	323.6227	25	401.5227	47	482.4045
4	329.2682	26	404.5318	48	486.2136
5	334.75	27	407.7864	49	490.0227
6	340.15	28	411.05	49.83333	493.1591
7	345.25	29	414.4409		
8	350.1682	30	418.0136		
9	354.8864	31	421.5773		
10	359.1045	32	425.25		
11	363.2045	33	428.8318		
12	366.8318	34	432.5955		
13	370.1045	35	436.3136		
14	373.2318	36	440.2227		
15	375.8864	37	443.9136		
16	378.4955	38	447.6955		
17	380.8318	39	451.6682		
18	383.1955	40	455.5864		
19	385.5682	41	459.4227		
20	387.95	42	463.3864		
21	390.5136	43	467.2591		

ข2. ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในกรณีของฟางข้าว

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
0	309.15	0.1125	309.61292	0.225	310.07539	0.3375	310.53741
0.0041667	309.16715	0.1166667	309.63006	0.2291667	310.09251	0.3416667	310.55452
0.0083333	309.18431	0.1208333	309.64719	0.2333333	310.10963	0.3458333	310.57162
0.0125	309.20146	0.125	309.66433	0.2375	310.12675	0.35	310.58872
0.0166667	309.21861	0.1291667	309.68146	0.2416667	310.14387	0.3541667	310.60582
0.0208333	309.23576	0.1333333	309.6986	0.2458333	310.16099	0.3583333	310.62292
0.025	309.25291	0.1375	309.71573	0.25	310.1781	0.3625	310.64002
0.0291667	309.27006	0.1416667	309.73286	0.2541667	310.19522	0.3666667	310.65712
0.0333333	309.28721	0.1458333	309.75	0.2583333	310.21233	0.3708333	310.67422
0.0375	309.30436	0.15	309.76713	0.2625	310.22945	0.375	310.69132
0.0416667	309.3215	0.1541667	309.78426	0.2666667	310.24656	0.3791667	310.70842
0.0458333	309.33865	0.1583333	309.80139	0.2708333	310.26368	0.3833333	310.72552
0.05	309.3558	0.1625	309.81852	0.275	310.28079	0.3875	310.74261
0.0541667	309.37294	0.1666667	309.83565	0.2791667	310.2979	0.3916667	310.75971
0.0583333	309.39009	0.1708333	309.85278	0.2833333	310.31502	0.3958333	310.7768
0.0625	309.40723	0.175	309.8699	0.2875	310.33213	0.4	310.7939
0.0666667	309.42438	0.1791667	309.88703	0.2916667	310.34924	0.4041667	310.81099
0.0708333	309.44152	0.1833333	309.90416	0.2958333	310.36635	0.4083333	310.82809
0.075	309.45866	0.1875	309.92128	0.3	310.38346	0.4125	310.84518
0.0791667	309.47581	0.1916667	309.93841	0.3041667	310.40057	0.4166667	310.86227
0.0833333	309.49295	0.1958333	309.95553	0.3083333	310.41767	0.4208333	310.87936
0.0875	309.51009	0.2	309.97266	0.3125	310.43478	0.425	310.89645
0.0916667	309.52723	0.2041667	309.98978	0.3166667	310.45189	0.4291667	310.91354
0.0958333	309.54437	0.2083333	310.00691	0.3208333	310.46899	0.4333333	310.93063
0.1	309.56151	0.2125	310.02403	0.325	310.4861	0.4375	310.94772

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
0.45	310.99899	0.5625	311.46011	0.675	311.92079	0.7875	312.38101
0.4541667	311.01607	0.5666667	311.47718	0.6791667	311.93784	0.7916667	312.39805
0.4583333	311.03316	0.5708333	311.49425	0.6833333	311.95489	0.7958333	312.41509
0.4625	311.05025	0.575	311.51132	0.6875	311.97194	0.8	312.43212
0.4666667	311.06733	0.5791667	311.52839	0.6916667	311.989	0.8041667	312.44916
0.4708333	311.08441	0.5833333	311.54546	0.6958333	312.00605	0.8083333	312.46619
0.475	311.1015	0.5875	311.56252	0.7	312.0231	0.8125	312.48322
0.4791667	311.11858	0.5916667	311.57959	0.7041667	312.04015	0.8166667	312.50026
0.4833333	311.13566	0.5958333	311.59665	0.7083333	312.0572	0.8208333	312.51729
0.4875	311.15275	0.6	311.61372	0.7125	312.07425	0.825	312.53432
0.4916667	311.16983	0.6041667	311.63078	0.7166667	312.09129	0.8291667	312.55135
0.4958333	311.18691	0.6083333	311.64785	0.7208333	312.10834	0.8333333	312.56838
0.5	311.20399	0.6125	311.66491	0.725	312.12539	0.8375	312.58541
0.5041667	311.22107	0.6166667	311.68197	0.7291667	312.14243	0.8416667	312.60244
0.5083333	311.23814	0.6208333	311.69904	0.7333333	312.15948	0.8458333	312.61947
0.5125	311.25522	0.625	311.7161	0.7375	312.17652	0.85	312.6365
0.5166667	311.2723	0.6291667	311.73316	0.7416667	312.19357	0.8541667	312.65353
0.5208333	311.28938	0.6333333	311.75022	0.7458333	312.21061	0.8583333	312.67055
0.525	311.30645	0.6375	311.76728	0.75	312.22765	0.8625	312.68758
0.5291667	311.32353	0.6416667	311.78434	0.7541667	312.2447	0.8666667	312.70461
0.5333333	311.3406	0.6458333	311.8014	0.7583333	312.26174	0.8708333	312.72163
0.5375	311.35768	0.65	311.81845	0.7625	312.27878	0.875	312.73866
0.5416667	311.37475	0.6541667	311.83551	0.7666667	312.29582	0.8791667	312.75568
0.5458333	311.39183	0.6583333	311.85257	0.7708333	312.31286	0.8833333	312.7727
0.55	311.4089	0.6625	311.86962	0.775	312.3299	0.8875	312.78973
0.5541667	311.42597	0.6666667	311.88668	0.7791667	312.34694	0.8916667	312.80675
0.5583333	311.44304	0.6708333	311.90373	0.7833333	312.36398	0.8958333	312.82377

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
0.9	312.84079	1.0125	313.30012	1.125	313.759	1.2375	314.21743
0.9041667	312.85781	1.0166667	313.31712	1.1291667	313.77598	1.2416667	314.2344
0.9083333	312.87483	1.0208333	313.33412	1.1333333	313.79297	1.2458333	314.25137
0.9125	312.89185	1.025	313.35113	1.1375	313.80996	1.25	314.26834
0.9166667	312.90887	1.0291667	313.36813	1.1416667	313.82694	1.2541667	314.2853
0.9208333	312.92588	1.0333333	313.38513	1.1458333	313.84393	1.2583333	314.30227
0.925	312.9429	1.0375	313.40213	1.15	313.86091	1.2625	314.31924
0.9291667	312.95992	1.0416667	313.41913	1.1541667	313.87789	1.2666667	314.33621
0.9333333	312.97693	1.0458333	313.43613	1.1583333	313.89488	1.2708333	314.35317
0.9375	312.99395	1.05	313.45313	1.1625	313.91186	1.275	314.37014
0.9416667	313.01096	1.0541667	313.47013	1.1666667	313.92884	1.2791667	314.3871
0.9458333	313.02798	1.0583333	313.48712	1.1708333	313.94582	1.2833333	314.40407
0.95	313.04499	1.0625	313.50412	1.175	313.9628	1.2875	314.42103
0.9541667	313.062	1.0666667	313.52112	1.1791667	313.97978	1.2916667	314.43799
0.9583333	313.07902	1.0708333	313.53811	1.1833333	313.99676	1.2958333	314.45496
0.9625	313.09603	1.075	313.55511	1.1875	314.01374	1.3	314.47192
0.9666667	313.11304	1.0791667	313.5721	1.1916667	314.03071	1.3041667	314.48888
0.9708333	313.13005	1.0833333	313.58909	1.1958333	314.04769	1.3083333	314.50584
0.975	313.14706	1.0875	313.60609	1.2	314.06467	1.3125	314.5228
0.9791667	313.16407	1.0916667	313.62308	1.2041667	314.08164	1.3166667	314.53976
0.9833333	313.18108	1.0958333	313.64007	1.2083333	314.09862	1.3208333	314.55672
0.9875	313.19808	1.1	313.65706	1.2125	314.11559	1.325	314.57367
0.9916667	313.21509	1.1041667	313.67405	1.2166667	314.13257	1.3291667	314.59063
0.9958333	313.2321	1.1083333	313.69104	1.2208333	314.14954	1.3333333	314.60759
1	313.2491	1.1125	313.70803	1.225	314.16651	1.3375	314.62454
1.0041667	313.26611	1.1166667	313.72502	1.2291667	314.18348	1.3416667	314.6415
1.0083333	313.28311	1.1208333	313.74201	1.2333333	314.20046	1.3458333	314.65845

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
1.35	314.67541	1.4625	315.13294	1.575	315.59003	1.6875	316.04666
1.3541667	314.69236	1.4666667	315.14988	1.5791667	315.60695	1.6916667	316.06356
1.3583333	314.70932	1.4708333	315.16681	1.5833333	315.62387	1.6958333	316.08047
1.3625	314.72627	1.475	315.18375	1.5875	315.64078	1.7	316.09737
1.3666667	314.74322	1.4791667	315.20069	1.5916667	315.6577	1.7041667	316.11427
1.3708333	314.76017	1.4833333	315.21762	1.5958333	315.67462	1.7083333	316.13117
1.375	314.77712	1.4875	315.23455	1.6	315.69154	1.7125	316.14807
1.3791667	314.79407	1.4916667	315.25149	1.6041667	315.70846	1.7166667	316.16497
1.3833333	314.81102	1.4958333	315.26842	1.6083333	315.72537	1.7208333	316.18187
1.3875	314.82797	1.5	315.28535	1.6125	315.74229	1.725	316.19877
1.3916667	314.84492	1.5041667	315.30228	1.6166667	315.7592	1.7291667	316.21567
1.3958333	314.86187	1.5083333	315.31921	1.6208333	315.77612	1.7333333	316.23257
1.4	314.87881	1.5125	315.33615	1.625	315.79303	1.7375	316.24947
1.4041667	314.89576	1.5166667	315.35307	1.6291667	315.80994	1.7416667	316.26636
1.4083333	314.9127	1.5208333	315.37	1.6333333	315.82686	1.7458333	316.28326
1.4125	314.92965	1.525	315.38693	1.6375	315.84377	1.75	316.30015
1.4166667	314.94659	1.5291667	315.40386	1.6416667	315.86068	1.7541667	316.31705
1.4208333	314.96354	1.5333333	315.42079	1.6458333	315.87759	1.7583333	316.33394
1.425	314.98048	1.5375	315.43771	1.65	315.8945	1.7625	316.35083
1.4291667	314.99742	1.5416667	315.45464	1.6541667	315.91141	1.7666667	316.36772
1.4333333	315.01436	1.5458333	315.47157	1.6583333	315.92832	1.7708333	316.38462
1.4375	315.03131	1.55	315.48849	1.6625	315.94522	1.775	316.40151
1.4416667	315.04825	1.5541667	315.50541	1.6666667	315.96213	1.7791667	316.4184
1.4458333	315.06519	1.5583333	315.52234	1.6708333	315.97904	1.7833333	316.43528
1.45	315.08213	1.5625	315.53926	1.675	315.99595	1.7875	316.45217
1.4541667	315.09907	1.5666667	315.55618	1.6791667	316.01285	1.7916667	316.46906
1.4583333	315.116	1.5708333	315.5731	1.6833333	316.02976	1.7958333	316.48595

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
1.8	316.50283	1.9125	316.95847	2.025	317.41357	2.1375	317.86812
1.8041667	316.51972	1.9166667	316.97534	2.0291667	317.43041	2.1416667	317.88495
1.8083333	316.5366	1.9208333	316.9922	2.0333333	317.44726	2.1458333	317.90177
1.8125	316.55349	1.925	317.00906	2.0375	317.4641	2.15	317.91859
1.8166667	316.57037	1.9291667	317.02593	2.0416667	317.48094	2.1541667	317.93542
1.8208333	316.58725	1.9333333	317.04279	2.0458333	317.49779	2.1583333	317.95224
1.825	316.60413	1.9375	317.05965	2.05	317.51463	2.1625	317.96906
1.8291667	316.62101	1.9416667	317.07651	2.0541667	317.53147	2.1666667	317.98588
1.8333333	316.63789	1.9458333	317.09337	2.0583333	317.54831	2.1708333	318.0027
1.8375	316.65477	1.95	317.11023	2.0625	317.56515	2.175	318.01952
1.8416667	316.67165	1.9541667	317.12709	2.0666667	317.58198	2.1791667	318.03634
1.8458333	316.68853	1.9583333	317.14395	2.0708333	317.59882	2.1833333	318.05315
1.85	316.70541	1.9625	317.1608	2.075	317.61566	2.1875	318.06997
1.8541667	316.72228	1.9666667	317.17766	2.0791667	317.6325	2.1916667	318.08679
1.8583333	316.73916	1.9708333	317.19452	2.0833333	317.64933	2.1958333	318.1036
1.8625	316.75603	1.975	317.21137	2.0875	317.66616	2.2	318.12042
1.8666667	316.77291	1.9791667	317.22822	2.0916667	317.683	2.2041667	318.13723
1.8708333	316.78978	1.9833333	317.24508	2.0958333	317.69983	2.2083333	318.15404
1.875	316.80665	1.9875	317.26193	2.1	317.71666	2.2125	318.17086
1.8791667	316.82352	1.9916667	317.27878	2.1041667	317.7335	2.2166667	318.18767
1.8833333	316.8404	1.9958333	317.29563	2.1083333	317.75033	2.2208333	318.20448
1.8875	316.85727	2	317.31248	2.1125	317.76716	2.225	318.22129
1.8916667	316.87414	2.0041667	317.32933	2.1166667	317.78399	2.2291667	318.2381
1.8958333	316.891	2.0083333	317.34618	2.1208333	317.80081	2.2333333	318.25491
1.9	316.90787	2.0125	317.36303	2.125	317.81764	2.2375	318.27171
1.9041667	316.92474	2.0166667	317.37988	2.1291667	317.83447	2.2416667	318.28852
1.9083333	316.94161	2.0208333	317.39672	2.1333333	317.8513	2.2458333	318.30533

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
2.25	318.32213	2.3625	318.7756	2.475	319.22853	2.5875	319.68091
2.2541667	318.33894	2.3666667	318.79239	2.4791667	319.24529	2.5916667	319.69766
2.2583333	318.35574	2.3708333	318.80917	2.4833333	319.26206	2.5958333	319.7144
2.2625	318.37255	2.375	318.82595	2.4875	319.27882	2.6	319.73114
2.2666667	318.38935	2.3791667	318.84274	2.4916667	319.29558	2.6041667	319.74789
2.2708333	318.40615	2.3833333	318.85952	2.4958333	319.31234	2.6083333	319.76463
2.275	318.42295	2.3875	318.8763	2.5	319.3291	2.6125	319.78137
2.2791667	318.43975	2.3916667	318.89308	2.5041667	319.34586	2.6166667	319.79811
2.2833333	318.45655	2.3958333	318.90986	2.5083333	319.36262	2.6208333	319.81485
2.2875	318.47335	2.4	318.92664	2.5125	319.37938	2.625	319.83159
2.2916667	318.49015	2.4041667	318.94342	2.5166667	319.39614	2.6291667	319.84832
2.2958333	318.50694	2.4083333	318.96019	2.5208333	319.4129	2.6333333	319.86506
2.3	318.52374	2.4125	318.97697	2.525	319.42965	2.6375	319.8818
2.3041667	318.54054	2.4166667	318.99374	2.5291667	319.44641	2.6416667	319.89853
2.3083333	318.55733	2.4208333	319.01052	2.5333333	319.46316	2.6458333	319.91527
2.3125	318.57413	2.425	319.02729	2.5375	319.47992	2.65	319.932
2.3166667	318.59092	2.4291667	319.04407	2.5416667	319.49667	2.6541667	319.94873
2.3208333	318.60771	2.4333333	319.06084	2.5458333	319.51343	2.6583333	319.96547
2.325	318.62451	2.4375	319.07761	2.55	319.53018	2.6625	319.9822
2.3291667	318.6413	2.4416667	319.09438	2.5541667	319.54693	2.6666667	319.99893
2.3333333	318.65809	2.4458333	319.11115	2.5583333	319.56368	2.6708333	320.01566
2.3375	318.67488	2.45	319.12792	2.5625	319.58043	2.675	320.03239
2.3416667	318.69167	2.4541667	319.14469	2.5666667	319.59718	2.6791667	320.04912
2.3458333	318.70846	2.4583333	319.16146	2.5708333	319.61393	2.6833333	320.06585
2.35	318.72524	2.4625	319.17823	2.575	319.63067	2.6875	320.08258
2.3541667	318.74203	2.4666667	319.195	2.5791667	319.64742	2.6916667	320.0993
2.3583333	318.75882	2.4708333	319.21176	2.5833333	319.66417	2.6958333	320.11603

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
2.7	320.13275	2.8125	320.58405	2.925	321.03481	3.0375	321.48503
2.7041667	320.14948	2.8166667	320.60076	2.9291667	321.05149	3.0416667	321.50169
2.7083333	320.1662	2.8208333	320.61746	2.9333333	321.06818	3.0458333	321.51835
2.7125	320.18292	2.825	320.63416	2.9375	321.08486	3.05	321.53502
2.7166667	320.19965	2.8291667	320.65087	2.9416667	321.10154	3.0541667	321.55168
2.7208333	320.21637	2.8333333	320.66757	2.9458333	321.11822	3.0583333	321.56834
2.725	320.23309	2.8375	320.68427	2.95	321.1349	3.0625	321.585
2.7291667	320.24981	2.8416667	320.70097	2.9541667	321.15158	3.0666667	321.60166
2.7333333	320.26653	2.8458333	320.71767	2.9583333	321.16826	3.0708333	321.61832
2.7375	320.28325	2.85	320.73437	2.9625	321.18494	3.075	321.63498
2.7416667	320.29996	2.8541667	320.75106	2.9666667	321.20162	3.0791667	321.65164
2.7458333	320.31668	2.8583333	320.76776	2.9708333	321.2183	3.0833333	321.66829
2.75	320.3334	2.8625	320.78446	2.975	321.23497	3.0875	321.68495
2.7541667	320.35011	2.8666667	320.80115	2.9791667	321.25165	3.0916667	321.7016
2.7583333	320.36683	2.8708333	320.81785	2.9833333	321.26832	3.0958333	321.71826
2.7625	320.38354	2.875	320.83454	2.9875	321.285	3.1	321.73491
2.7666667	320.40026	2.8791667	320.85123	2.9916667	321.30167	3.1041667	321.75156
2.7708333	320.41697	2.8833333	320.86793	2.9958333	321.31834	3.1083333	321.76822
2.775	320.43368	2.8875	320.88462	3	321.33501	3.1125	321.78487
2.7791667	320.45039	2.8916667	320.90131	3.0041667	321.35169	3.1166667	321.80152
2.7833333	320.4671	2.8958333	320.918	3.0083333	321.36836	3.1208333	321.81817
2.7875	320.48381	2.9	320.93469	3.0125	321.38502	3.125	321.83482
2.7916667	320.50052	2.9041667	320.95138	3.0166667	321.40169	3.1291667	321.85147
2.7958333	320.51723	2.9083333	320.96807	3.0208333	321.41836	3.1333333	321.86812
2.8	320.53394	2.9125	320.98475	3.025	321.43503	3.1375	321.88476
2.8041667	320.55064	2.9166667	321.00144	3.0291667	321.4517	3.1416667	321.90141
2.8083333	320.56735	2.9208333	321.01813	3.0333333	321.46836	3.1458333	321.91806

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
3.6	323.72791	3.7125	324.17483	3.825	324.6212	3.9375	325.06702
3.6041667	323.74447	3.7166667	324.19137	3.8291667	324.63772	3.9416667	325.08352
3.6083333	323.76103	3.7208333	324.20791	3.8333333	324.65424	3.9458333	325.10002
3.6125	323.77759	3.725	324.22445	3.8375	324.67076	3.95	325.11652
3.6166667	323.79415	3.7291667	324.24099	3.8416667	324.68728	3.9541667	325.13302
3.6208333	323.81071	3.7333333	324.25753	3.8458333	324.7038	3.9583333	325.14952
3.625	323.82727	3.7375	324.27407	3.85	324.72032	3.9625	325.16602
3.6291667	323.84383	3.7416667	324.29061	3.8541667	324.73684	3.9666667	325.18251
3.6333333	323.86039	3.7458333	324.30714	3.8583333	324.75335	3.9708333	325.19901
3.6375	323.87694	3.75	324.32368	3.8625	324.76987	3.975	325.21551
3.6416667	323.8935	3.7541667	324.34022	3.8666667	324.78638	3.9791667	325.232
3.6458333	323.91005	3.7583333	324.35675	3.8708333	324.8029	3.9833333	325.24849
3.65	323.92661	3.7625	324.37328	3.875	324.81941	3.9875	325.26499
3.6541667	323.94316	3.7666667	324.38982	3.8791667	324.83592	3.9916667	325.28148
3.6583333	323.95971	3.7708333	324.40635	3.8833333	324.85244	3.9958333	325.29797
3.6625	323.97627	3.775	324.42288	3.8875	324.86895	4	325.31446
3.6666667	323.99282	3.7791667	324.43941	3.8916667	324.88546	4.0041667	325.33095
3.6708333	324.00937	3.7833333	324.45594	3.8958333	324.90197	4.0083333	325.34744
3.675	324.02592	3.7875	324.47247	3.9	324.91848	4.0125	325.36393
3.6791667	324.04247	3.7916667	324.489	3.9041667	324.93498	4.0166667	325.38042
3.6833333	324.05901	3.7958333	324.50553	3.9083333	324.95149	4.0208333	325.3969
3.6875	324.07556	3.8	324.52205	3.9125	324.968	4.025	325.41339
3.6916667	324.09211	3.8041667	324.53858	3.9166667	324.9845	4.0291667	325.42987
3.6958333	324.10865	3.8083333	324.55511	3.9208333	325.00101	4.0333333	325.44636
3.7	324.1252	3.8125	324.57163	3.925	325.01751	4.0375	325.46284
3.7041667	324.14174	3.8166667	324.58815	3.9291667	325.03402	4.0416667	325.47933
3.7083333	324.15829	3.8208333	324.60468	3.9333333	325.05052	4.0458333	325.49581

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K**(ต่อ)**

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
5.4	330.81289	5.5125	331.25109	5.625	331.68876	5.7375	332.12594
5.4041667	330.82913	5.5166667	331.26731	5.6291667	331.70496	5.7416667	332.14212
5.4083333	330.84537	5.5208333	331.28353	5.6333333	331.72116	5.7458333	332.1583
5.4125	330.86161	5.525	331.29975	5.6375	331.73736	5.75	332.17448
5.4166667	330.87784	5.5291667	331.31597	5.6416667	331.75355	5.7541667	332.19067
5.4208333	330.89408	5.5333333	331.33218	5.6458333	331.76975	5.7583333	332.20685
5.425	330.91032	5.5375	331.3484	5.65	331.78595	5.7625	332.22303
5.4291667	330.92655	5.5416667	331.36461	5.6541667	331.80214	5.7666667	332.23921
5.4333333	330.94278	5.5458333	331.38083	5.6583333	331.81834	5.7708333	332.25539
5.4375	330.95902	5.55	331.39704	5.6625	331.83453	5.775	332.27156
5.4416667	330.97525	5.5541667	331.41325	5.6666667	331.85073	5.7791667	332.28774
5.4458333	330.99148	5.5583333	331.42947	5.6708333	331.86692	5.7833333	332.30392
5.45	331.00771	5.5625	331.44568	5.675	331.88312	5.7875	332.32009
5.4541667	331.02394	5.5666667	331.46189	5.6791667	331.89931	5.7916667	332.33627
5.4583333	331.04017	5.5708333	331.4781	5.6833333	331.9155	5.7958333	332.35245
5.4625	331.0564	5.575	331.49431	5.6875	331.93169	5.8	332.36862
5.4666667	331.07263	5.5791667	331.51052	5.6916667	331.94788	5.8041667	332.38479
5.4708333	331.08886	5.5833333	331.52672	5.6958333	331.96407	5.8083333	332.40097
5.475	331.10509	5.5875	331.54293	5.7	331.98026	5.8125	332.41714
5.4791667	331.12131	5.5916667	331.55914	5.7041667	331.99645	5.8166667	332.43331
5.4833333	331.13754	5.5958333	331.57534	5.7083333	332.01264	5.8208333	332.44948
5.4875	331.15376	5.6	331.59155	5.7125	332.02883	5.825	332.46565
5.4916667	331.16999	5.6041667	331.60775	5.7166667	332.04501	5.8291667	332.48182
5.4958333	331.18621	5.6083333	331.62395	5.7208333	332.0612	5.8333333	332.49799
5.5	331.20243	5.6125	331.64016	5.725	332.07738	5.8375	332.51416
5.5041667	331.21865	5.6166667	331.65636	5.7291667	332.09357	5.8416667	332.53033
5.5083333	331.23487	5.6208333	331.67256	5.7333333	332.10975	5.8458333	332.5465

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
7.65	339.48857	7.7625	**339.9176**	7.875	340.34613	7.9875	340.77415
7.6541667	339.50447	7.7666667	339.93346	7.8791667	340.36199	7.9916667	340.78999
7.6583333	339.52037	7.7708333	339.94934	7.8833333	340.37785	7.9958333	340.80584
7.6625	339.53626	7.775	339.96522	7.8875	340.39371	8	340.82168
7.6666667	339.55216	7.7791667	339.9811	7.8916667	340.40957	8.0041667	340.83752
7.6708333	339.56805	7.7833333	339.99698	7.8958333	340.42543	8.0083333	340.85336
7.675	339.58395	7.7875	340.01285	7.9	340.44129	8.0125	340.86919
7.6791667	339.59984	7.7916667	340.02873	7.9041667	340.45715	8.0166667	340.88503
7.6833333	339.61573	7.7958333	340.04461	7.9083333	340.47301	8.0208333	340.90087
7.6875	339.63163	7.8	340.06048	7.9125	340.48886	8.025	340.91671
7.6916667	339.64752	7.8041667	340.07636	7.9166667	340.50472	8.0291667	340.93254
7.6958333	339.66341	7.8083333	340.09223	7.9208333	340.52057	8.0333333	340.94838
7.7	339.6793	7.8125	340.1081	7.925	340.53643	8.0375	340.96421
7.7041667	339.69519	7.8166667	340.12398	7.9291667	340.55228	8.0416667	340.98004
7.7083333	339.71108	7.8208333	340.13985	7.9333333	340.56813	8.0458333	340.99588
7.7125	339.72697	7.825	340.15572	7.9375	340.58399	8.05	341.01171
7.7166667	339.74285	7.8291667	340.17159	7.9416667	340.59984	8.0541667	341.02754
7.7208333	339.75874	7.8333333	340.18746	7.9458333	340.61569	8.0583333	341.04337
7.725	339.77463	7.8375	340.20333	7.95	340.63154	8.0625	341.0592
7.7291667	339.79051	7.8416667	340.2192	7.9541667	340.64739	8.0666667	341.07503
7.7333333	339.8064	7.8458333	340.23507	7.9583333	340.66323	8.0708333	341.09086
7.7375	339.82228	7.85	340.25094	7.9625	340.67908	8.075	341.10668
7.7416667	339.83817	7.8541667	340.2668	7.9666667	340.69493	8.0791667	341.12251
7.7458333	339.85405	7.8583333	340.28267	7.9708333	340.71078	8.0833333	341.13834
7.75	339.86993	7.8625	340.29854	7.975	340.72662	8.0875	341.15416
7.7541667	339.88582	7.8666667	340.3144	7.9791667	340.74247	8.0916667	341.16998
7.7583333	339.9017	7.8708333	340.33026	7.9833333	340.75831	8.0958333	341.18581

ตารางผนวกข. 5ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
8.1	341.20163	8.2125	341.62855	8.325	342.05493	8.4375	342.48077
8.1041667	341.21745	8.2166667	341.64435	8.3291667	342.07071	8.4416667	342.49653
8.1083333	341.23327	8.2208333	341.66015	8.3333333	342.08649	8.4458333	342.51229
8.1125	341.24909	8.225	341.67595	8.3375	342.10227	8.45	342.52805
8.1166667	341.26491	8.2291667	341.69175	8.3416667	342.11805	8.4541667	342.54381
8.1208333	341.28073	8.2333333	341.70755	8.3458333	342.13383	8.4583333	342.55957
8.125	341.29655	8.2375	341.72335	8.35	342.14961	8.4625	342.57533
8.1291667	341.31237	8.2416667	341.73915	8.3541667	342.16539	8.4666667	342.59108
8.1333333	341.32818	8.2458333	341.75494	8.3583333	342.18116	8.4708333	342.60684
8.1375	341.344	8.25	341.77074	8.3625	342.19694	8.475	342.6226
8.1416667	341.35981	8.2541667	341.78653	8.3666667	342.21271	8.4791667	342.63835
8.1458333	341.37563	8.2583333	341.80233	8.3708333	342.22849	8.4833333	342.65411
8.15	341.39144	8.2625	341.81812	8.375	342.24426	8.4875	342.66986
8.1541667	341.40725	8.2666667	341.83391	8.3791667	342.26003	8.4916667	342.68561
8.1583333	341.42306	8.2708333	341.8497	8.3833333	342.2758	8.4958333	342.70136
8.1625	341.43888	8.275	341.8655	8.3875	342.29158	8.5	342.71711
8.1666667	341.45469	8.2791667	341.88129	8.3916667	342.30735	8.5041667	342.73286
8.1708333	341.4705	8.2833333	341.89708	8.3958333	342.32312	8.5083333	342.74861
8.175	341.4863	8.2875	341.91286	8.4	342.33888	8.5125	342.76436
8.1791667	341.50211	8.2916667	341.92865	8.4041667	342.35465	8.5166667	342.78011
8.1833333	341.51792	8.2958333	341.94444	8.4083333	342.37042	8.5208333	342.79586
8.1875	341.53373	8.3	341.96023	8.4125	342.38619	8.525	342.8116
8.1916667	341.54953	8.3041667	341.97601	8.4166667	342.40195	8.5291667	342.82735
8.1958333	341.56534	8.3083333	341.9918	8.4208333	342.41772	8.5333333	342.8431
8.2	341.58114	8.3125	342.00758	8.425	342.43348	8.5375	342.85884
8.2041667	341.59695	8.3166667	342.02337	8.4291667	342.44925	8.5416667	342.87458
8.2083333	341.61275	8.3208333	342.03915	8.4333333	342.46501	8.5458333	342.89033

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
8.55	342.90607	8.6625	343.33083	8.775	343.75505	8.8875	344.17872
8.5541667	342.92181	8.6666667	343.34655	8.7791667	343.77075	8.8916667	344.1944
8.5583333	342.93755	8.6708333	343.36227	8.7833333	343.78645	8.8958333	344.21009
8.5625	342.95329	8.675	343.37799	8.7875	343.80215	8.9	344.22577
8.5666667	342.96903	8.6791667	343.39371	8.7916667	343.81785	8.9041667	344.24144
8.5708333	342.98477	8.6833333	343.40943	8.7958333	343.83354	8.9083333	344.25712
8.575	343.00051	8.6875	343.42514	8.8	343.84924	8.9125	344.2728
8.5791667	343.01624	8.6916667	343.44086	8.8041667	343.86494	8.9166667	344.28848
8.5833333	343.03198	8.6958333	343.45658	8.8083333	343.88064	8.9208333	344.30415
8.5875	343.04771	8.7	343.47229	8.8125	343.89633	8.925	344.31983
8.5916667	343.06345	8.7041667	343.48801	8.8166667	343.91203	8.9291667	344.3355
8.5958333	343.07918	8.7083333	343.50372	8.8208333	343.92772	8.9333333	344.35118
8.6	343.09492	8.7125	343.51944	8.825	343.94341	8.9375	344.36685
8.6041667	343.11065	8.7166667	343.53515	8.8291667	343.95911	8.9416667	344.38252
8.6083333	343.12638	8.7208333	343.55086	8.8333333	343.9748	8.9458333	344.3982
8.6125	343.14211	8.725	343.56657	8.8375	343.99049	8.95	344.41387
8.6166667	343.15784	8.7291667	343.58228	8.8416667	344.00618	8.9541667	344.42954
8.6208333	343.17357	8.7333333	343.59799	8.8458333	344.02187	8.9583333	344.44521
8.625	343.1893	8.7375	343.6137	8.85	344.03756	8.9625	344.46088
8.6291667	343.20503	8.7416667	343.62941	8.8541667	344.05325	8.9666667	344.47654
8.6333333	343.22076	8.7458333	343.64511	8.8583333	344.06893	8.9708333	344.49221
8.6375	343.23648	8.75	343.66082	8.8625	344.08462	8.975	344.50788
8.6416667	343.25221	8.7541667	343.67653	8.8666667	344.10031	8.9791667	344.52354
8.6458333	343.26793	8.7583333	343.69223	8.8708333	344.11599	8.9833333	344.53921
8.65	343.28366	8.7625	343.70794	8.875	344.13167	8.9875	344.55487
8.6541667	343.29938	8.7666667	343.72364	8.8791667	344.14736	8.9916667	344.57054
8.6583333	343.3151	8.7708333	343.73934	8.8833333	344.16304	8.9958333	344.5862

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
9	344.60186	9.1125	345.02446	9.225	345.44651	9.3375	345.86802
9.0041667	344.61752	9.1166667	345.0401	9.2291667	345.46213	9.3416667	345.88362
9.0083333	344.63318	9.1208333	345.05574	9.2333333	345.47775	9.3458333	345.89922
9.0125	344.64884	9.125	345.07138	9.2375	345.49337	9.35	345.91482
9.0166667	344.6645	9.1291667	345.08702	9.2416667	345.50899	9.3541667	345.93042
9.0208333	344.68016	9.1333333	345.10265	9.2458333	345.52461	9.3583333	345.94601
9.025	344.69582	9.1375	345.11829	9.25	345.54022	9.3625	345.96161
9.0291667	344.71147	9.1416667	345.13393	9.2541667	345.55584	9.3666667	345.97721
9.0333333	344.72713	9.1458333	345.14956	9.2583333	345.57146	9.3708333	345.9928
9.0375	344.74279	9.15	345.1652	9.2625	345.58707	9.375	346.0084
9.0416667	344.75844	9.1541667	345.18083	9.2666667	345.60269	9.3791667	346.02399
9.0458333	344.77409	9.1583333	345.19647	9.2708333	345.6183	9.3833333	346.03959
9.05	344.78975	9.1625	345.2121	9.275	345.63391	9.3875	346.05518
9.0541667	344.8054	9.1666667	345.22773	9.2791667	345.64952	9.3916667	346.07077
9.0583333	344.82105	9.1708333	345.24337	9.2833333	345.66514	9.3958333	346.08636
9.0625	344.8367	9.175	345.259	9.2875	345.68075	9.4	346.10195
9.0666667	344.85235	9.1791667	345.27463	9.2916667	345.69636	9.4041667	346.11754
9.0708333	344.868	9.1833333	345.29026	9.2958333	345.71197	9.4083333	346.13313
9.075	344.88365	9.1875	345.30588	9.3	345.72757	9.4125	346.14872
9.0791667	344.8993	9.1916667	345.32151	9.3041667	345.74318	9.4166667	346.16431
9.0833333	344.91495	9.1958333	345.33714	9.3083333	345.75879	9.4208333	346.1799
9.0875	344.93059	9.2	345.35277	9.3125	345.77439	9.425	346.19548
9.0916667	344.94624	9.2041667	345.36839	9.3166667	345.79	9.4291667	346.21107
9.0958333	344.96188	9.2083333	345.38402	9.3208333	345.80561	9.4333333	346.22665
9.1	344.97753	9.2125	345.39964	9.325	345.82121	9.4375	346.24224
9.1041667	344.99317	9.2166667	345.41526	9.3291667	345.83681	9.4416667	346.25782
9.1083333	345.00881	9.2208333	345.43089	9.3333333	345.85241	9.4458333	346.2734

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
9.45	346.28898	9.5625	346.70941	9.675	347.12929	9.7875	347.54863
9.4541667	346.30456	9.5666667	346.72497	9.6791667	347.14483	9.7916667	347.56416
9.4583333	346.32015	9.5708333	346.74053	9.6833333	347.16037	9.7958333	347.57968
9.4625	346.33572	9.575	346.75609	9.6875	347.17591	9.8	347.59519
9.4666667	346.3513	9.5791667	346.77165	9.6916667	347.19145	9.8041667	347.61071
9.4708333	346.36688	9.5833333	346.78721	9.6958333	347.20699	9.8083333	347.62623
9.475	346.38246	9.5875	346.80276	9.7	347.22253	9.8125	347.64175
9.4791667	346.39804	9.5916667	346.81832	9.7041667	347.23806	9.8166667	347.65726
9.4833333	346.41361	9.5958333	346.83388	9.7083333	347.2536	9.8208333	347.67278
9.4875	346.42919	9.6	346.84943	9.7125	347.26913	9.825	347.6883
9.4916667	346.44476	9.6041667	346.86498	9.7166667	347.28467	9.8291667	347.70381
9.4958333	346.46033	9.6083333	346.88054	9.7208333	347.3002	9.8333333	347.71932
9.5	346.47591	9.6125	346.89609	9.725	347.31573	9.8375	347.73484
9.5041667	346.49148	9.6166667	346.91164	9.7291667	347.33127	9.8416667	347.75035
9.5083333	346.50705	9.6208333	346.92719	9.7333333	347.3468	9.8458333	347.76586
9.5125	346.52262	9.625	346.94274	9.7375	347.36233	9.85	347.78137
9.5166667	346.53819	9.6291667	346.95829	9.7416667	347.37786	9.8541667	347.79688
9.5208333	346.55376	9.6333333	346.97384	9.7458333	347.39339	9.8583333	347.81239
9.525	346.56933	9.6375	346.98939	9.75	347.40891	9.8625	347.8279
9.5291667	346.5849	9.6416667	347.00494	9.7541667	347.42444	9.8666667	347.8434
9.5333333	346.60046	9.6458333	347.02049	9.7583333	347.43997	9.8708333	347.85891
9.5375	346.61603	9.65	347.03603	9.7625	347.45549	9.875	347.87442
9.5416667	346.63159	9.6541667	347.05158	9.7666667	347.47102	9.8791667	347.88992
9.5458333	346.64716	9.6583333	347.06712	9.7708333	347.48654	9.8833333	347.90543
9.55	346.66272	9.6625	347.08267	9.775	347.50207	9.8875	347.92093
9.5541667	346.67829	9.6666667	347.09821	9.7791667	347.51759	9.8916667	347.93643
9.5583333	346.69385	9.6708333	347.11375	9.7833333	347.53311	9.8958333	347.95193

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
10.8	351.29841	10.9125	351.71236	11.025	352.12578	11.1375	352.53866
10.804167	351.31375	10.916667	351.72768	11.029167	352.14108	11.141667	352.55394
10.808333	351.32909	10.920833	351.743	11.033333	352.15638	11.145833	352.56922
10.8125	351.34443	10.925	351.75832	11.0375	352.17168	11.15	352.5845
10.816667	351.35977	10.929167	351.77364	11.041667	352.18698	11.154167	352.59978
10.820833	351.37511	10.933333	351.78896	11.045833	352.20228	11.158333	352.61506
10.825	351.39045	10.9375	351.80428	11.05	352.21758	11.1625	352.63034
10.829167	351.40578	10.941667	351.8196	11.054167	352.23287	11.166667	352.64561
10.833333	351.42112	10.945833	351.83491	11.058333	352.24817	11.170833	352.66089
10.8375	351.43645	10.95	351.85023	11.0625	352.26346	11.175	352.67616
10.841667	351.45179	10.954167	351.86554	11.066667	352.27876	11.179167	352.69144
10.845833	351.46712	10.958333	351.88086	11.070833	352.29405	11.183333	352.70671
10.85	351.48246	10.9625	351.89617	11.075	352.30935	11.1875	352.72199
10.854167	351.49779	10.966667	351.91148	11.079167	352.32464	11.191667	352.73726
10.858333	351.51312	10.970833	351.92679	11.083333	352.33993	11.195833	352.75253
10.8625	351.52845	10.975	351.9421	11.0875	352.35522	11.2	352.7678
10.866667	351.54378	10.979167	351.95741	11.091667	352.37051	11.204167	352.78307
10.870833	351.55911	10.983333	351.97272	11.095833	352.3858	11.208333	352.79834
10.875	351.57444	10.9875	351.98803	11.1	352.40109	11.2125	352.81361
10.879167	351.58977	10.991667	352.00334	11.104167	352.41638	11.216667	352.82888
10.883333	351.60509	10.995833	352.01865	11.108333	352.43167	11.220833	352.84415
10.8875	351.62042	11	352.03395	11.1125	352.44695	11.225	352.85942
10.891667	351.63575	11.004167	352.04926	11.116667	352.46224	11.229167	352.87468
10.895833	351.65107	11.008333	352.06457	11.120833	352.47752	11.233333	352.88995
10.9	351.66639	11.0125	352.07987	11.125	352.49281	11.2375	352.90521
10.904167	351.68172	11.016667	352.09517	11.129167	352.50809	11.241667	352.92048
10.908333	351.69704	11.020833	352.11048	11.133333	352.52338	11.245833	352.93574

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
11.7	354.59502	11.8125	355.00469	11.925	355.41383	12.0375	355.82243
11.704167	354.6102	11.816667	355.01985	11.929167	355.42897	12.041667	355.83755
11.708333	354.62539	11.820833	355.03502	11.933333	355.44411	12.045833	355.85267
11.7125	354.64057	11.825	355.05018	11.9375	355.45925	12.05	355.86779
11.716667	354.65575	11.829167	355.06534	11.941667	355.47439	12.054167	355.88292
11.720833	354.67093	11.833333	355.0805	11.945833	355.48953	12.058333	355.89804
11.725	354.68611	11.8375	355.09566	11.95	355.50467	12.0625	355.91316
11.729167	354.70128	11.841667	355.11081	11.954167	355.51981	12.066667	355.92827
11.733333	354.71646	11.845833	355.12597	11.958333	355.53495	12.070833	355.94339
11.7375	354.73164	11.85	355.14113	11.9625	355.55009	12.075	355.95851
11.741667	354.74681	11.854167	355.15628	11.966667	355.56522	12.079167	355.97363
11.745833	354.76199	11.858333	355.17144	11.970833	355.58036	12.083333	355.98874
11.75	354.77716	11.8625	355.18659	11.975	355.59549	12.0875	356.00386
11.754167	354.79234	11.866667	355.20175	11.979167	355.61063	12.091667	356.01897
11.758333	354.80751	11.870833	355.2169	11.983333	355.62576	12.095833	356.03408
11.7625	354.82268	11.875	355.23205	11.9875	355.64089	12.1	356.0492
11.766667	354.83785	11.879167	355.24721	11.991667	355.65602	12.104167	356.06431
11.770833	354.85302	11.883333	355.26236	11.995833	355.67116	12.108333	356.07942
11.775	354.86819	11.8875	355.27751	12	355.68629	12.1125	356.09453
11.779167	354.88336	11.891667	355.29266	12.004167	355.70142	12.116667	356.10964
11.783333	354.89853	11.895833	355.30781	12.008333	355.71654	12.120833	356.12475
11.7875	354.9137	11.9	355.32295	12.0125	355.73167	12.125	356.13986
11.791667	354.92887	11.904167	355.3381	12.016667	355.7468	12.129167	356.15497
11.795833	354.94403	11.908333	355.35325	12.020833	355.76193	12.133333	356.17007
11.8	354.9592	11.9125	355.36839	12.025	355.77705	12.1375	356.18518
11.804167	354.97436	11.916667	355.38354	12.029167	355.79218	12.141667	356.20029
11.808333	354.98953	11.920833	355.39868	12.033333	355.8073	12.145833	356.21539

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
12.15	356.2305	12.2625	356.63803	12.375	357.04507	12.4875	357.45167
12.154167	356.2456	12.266667	356.65311	12.379167	357.06014	12.491667	357.46672
12.158333	356.2607	12.270833	356.6682	12.383333	357.07521	12.495833	357.48177
12.1625	356.2758	12.275	356.68328	12.3875	357.09027	12.5	357.49682
12.166667	356.2909	12.279167	356.69836	12.391667	357.10534	12.504167	357.51186
12.170833	356.306	12.283333	356.71344	12.395833	357.1204	12.508333	357.52691
12.175	356.3211	12.2875	356.72852	12.4	357.13547	12.5125	357.54196
12.179167	356.3362	12.291667	356.7436	12.404167	357.15053	12.516667	357.55701
12.183333	356.3513	12.295833	356.75868	12.408333	357.16559	12.520833	357.57205
12.1875	356.3664	12.3	356.77376	12.4125	357.18065	12.525	357.5871
12.191667	356.3815	12.304167	356.78884	12.416667	357.19571	12.529167	357.60214
12.195833	356.39659	12.308333	356.80392	12.420833	357.21078	12.533333	357.61719
12.2	356.41169	12.3125	356.81899	12.425	357.22584	12.5375	357.63223
12.204167	356.42678	12.316667	356.83407	12.429167	357.2409	12.541667	357.64727
12.208333	356.44188	12.320833	356.84914	12.433333	357.25595	12.545833	357.66232
12.2125	356.45697	12.325	356.86422	12.4375	357.27101	12.55	357.67736
12.216667	356.47206	12.329167	356.87929	12.441667	357.28607	12.554167	357.6924
12.220833	356.48715	12.333333	356.89437	12.445833	357.30113	12.558333	357.70744
12.225	356.50224	12.3375	356.90944	12.45	357.31618	12.5625	357.72248
12.229167	356.51733	12.341667	356.92451	12.454167	357.33124	12.566667	357.73752
12.233333	356.53242	12.345833	356.93959	12.458333	357.3463	12.570833	357.75256
12.2375	356.54751	12.35	356.95466	12.4625	357.36135	12.575	357.7676
12.241667	356.5626	12.354167	356.96973	12.466667	357.3764	12.579167	357.78263
12.245833	356.57769	12.358333	356.9848	12.470833	357.39146	12.583333	357.79767
12.25	356.59277	12.3625	356.99987	12.475	357.40651	12.5875	357.81271
12.254167	356.60786	12.366667	357.01494	12.479167	357.42156	12.591667	357.82774
12.258333	356.62295	12.370833	357.03	12.483333	357.43662	12.595833	357.84278

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
12.6	357.85781	12.7125	358.26351	12.825	358.66876	12.9375	359.07357
12.604167	357.87285	12.716667	358.27853	12.829167	358.68376	12.941667	359.08855
12.608333	357.88788	12.720833	358.29355	12.833333	358.69876	12.945833	359.10353
12.6125	357.90291	12.725	358.30856	12.8375	358.71376	12.95	359.11852
12.616667	357.91794	12.729167	358.32358	12.841667	358.72876	12.954167	359.1335
12.620833	357.93298	12.733333	358.33859	12.845833	358.74376	12.958333	359.14848
12.625	357.94801	12.7375	358.35361	12.85	358.75876	12.9625	359.16346
12.629167	357.96304	12.741667	358.36862	12.854167	358.77375	12.966667	359.17844
12.633333	357.97807	12.745833	358.38363	12.858333	358.78875	12.970833	359.19342
12.6375	357.9931	12.75	358.39864	12.8625	358.80375	12.975	359.2084
12.641667	358.00812	12.754167	358.41366	12.866667	358.81874	12.979167	359.22338
12.645833	358.02315	12.758333	358.42867	12.870833	358.83374	12.983333	359.23836
12.65	358.03818	12.7625	358.44368	12.875	358.84873	12.9875	359.25334
12.654167	358.0532	12.766667	358.45869	12.879167	358.86372	12.991667	359.26831
12.658333	358.06823	12.770833	358.4737	12.883333	358.87872	12.995833	359.28329
12.6625	358.08326	12.775	358.48871	12.8875	358.89371	13	359.29826
12.666667	358.09828	12.779167	358.50371	12.891667	358.9087	13.004167	359.31324
12.670833	358.1133	12.783333	358.51872	12.895833	358.92369	13.008333	359.32821
12.675	358.12833	12.7875	358.53373	12.9	358.93868	13.0125	359.34319
12.679167	358.14335	12.791667	358.54873	12.904167	358.95367	13.016667	359.35816
12.683333	358.15837	12.795833	358.56374	12.908333	358.96866	13.020833	359.37313
12.6875	358.17339	12.8	358.57875	12.9125	358.98365	13.025	359.3881
12.691667	358.18842	12.804167	358.59375	12.916667	358.99864	13.029167	359.40308
12.695833	358.20344	12.808333	358.60875	12.920833	359.01362	13.033333	359.41805
12.7	358.21846	12.8125	358.62376	12.925	359.02861	13.0375	359.43302
12.704167	358.23347	12.816667	358.63876	12.929167	359.0436	13.041667	359.44799
12.708333	358.24849	12.820833	358.65376	12.933333	359.05858	13.045833	359.46295

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
13.495833	361.07598	13.608333	361.47812	13.720833	361.87982	13.833333	362.28106
13.5	361.09088	13.6125	361.49301	13.725	361.89468	13.8375	362.29591
13.504167	361.10579	13.616667	361.50789	13.729167	361.90955	13.841667	362.31077
13.508333	361.12069	13.620833	361.52278	13.733333	361.92442	13.845833	362.32562
13.5125	361.13559	13.625	361.53766	13.7375	361.93929	13.85	362.34047
13.516667	361.15049	13.629167	361.55254	13.741667	361.95415	13.854167	362.35532
13.520833	361.16539	13.633333	361.56743	13.745833	361.96902	13.858333	362.37017
13.525	361.18028	13.6375	361.58231	13.75	361.98389	13.8625	362.38502
13.529167	361.19518	13.641667	361.59719	13.754167	361.99875	13.866667	362.39986
13.533333	361.21008	13.645833	361.61207	13.758333	362.01361	13.870833	362.41471
13.5375	361.22498	13.65	361.62695	13.7625	362.02848	13.875	362.42956
13.541667	361.23987	13.654167	361.64183	13.766667	362.04334	13.879167	362.4444
13.545833	361.25477	13.658333	361.65671	13.770833	362.0582	13.883333	362.45925
13.55	361.26966	13.6625	361.67159	13.775	362.07306	13.8875	362.47409
13.554167	361.28456	13.666667	361.68646	13.779167	362.08792	13.891667	362.48894
13.558333	361.29945	13.670833	361.70134	13.783333	362.10279	13.895833	362.50378
13.5625	361.31434	13.675	361.71622	13.7875	362.11764	13.9	362.51863
13.566667	361.32923	13.679167	361.73109	13.791667	362.1325	13.904167	362.53347
13.570833	361.34413	13.683333	361.74597	13.795833	362.14736	13.908333	362.54831
13.575	361.35902	13.6875	361.76084	13.8	362.16222	13.9125	362.56315
13.579167	361.37391	13.691667	361.77572	13.804167	362.17708	13.916667	362.57799
13.583333	361.3888	13.695833	361.79059	13.808333	362.19193	13.920833	362.59283
13.5875	361.40369	13.7	361.80546	13.8125	362.20679	13.925	362.60767
13.591667	361.41857	13.704167	361.82033	13.816667	362.22165	13.929167	362.62251
13.595833	361.43346	13.708333	361.83521	13.820833	362.2365	13.933333	362.63735
13.6	361.44835	13.7125	361.85008	13.825	362.25135	13.9375	362.65219
13.604167	361.46324	13.716667	361.86495	13.829167	362.26621	13.941667	362.66702

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
14.395833	364.28015	14.508333	364.67841	14.620833	365.07613	14.733333	365.47332
14.4	364.29491	14.5125	364.69315	14.625	365.09085	14.7375	365.48803
14.404167	364.30967	14.516667	364.70788	14.629167	365.10557	14.741667	365.50273
14.408333	364.32443	14.520833	364.72262	14.633333	365.12029	14.745833	365.51742
14.4125	364.33919	14.525	364.73736	14.6375	365.13501	14.75	365.53212
14.416667	364.35394	14.529167	364.7521	14.641667	365.14972	14.754167	365.54682
14.420833	364.3687	14.533333	364.76683	14.645833	365.16444	14.758333	365.56152
14.425	364.38345	14.5375	364.78157	14.65	365.17916	14.7625	365.57621
14.429167	364.39821	14.541667	364.7963	14.654167	365.19387	14.766667	365.59091
14.433333	364.41296	14.545833	364.81104	14.658333	365.20859	14.770833	365.60561
14.4375	364.42771	14.55	364.82577	14.6625	365.2233	14.775	365.6203
14.441667	364.44247	14.554167	364.84051	14.666667	365.23801	14.779167	365.63499
14.445833	364.45722	14.558333	364.85524	14.670833	365.25273	14.783333	365.64969
14.45	364.47197	14.5625	364.86997	14.675	365.26744	14.7875	365.66438
14.454167	364.48672	14.566667	364.8847	14.679167	365.28215	14.791667	365.67907
14.458333	364.50147	14.570833	364.89943	14.683333	365.29686	14.795833	365.69376
14.4625	364.51622	14.575	364.91416	14.6875	365.31157	14.8	365.70845
14.466667	364.53097	14.579167	364.92889	14.691667	365.32628	14.804167	365.72314
14.470833	364.54571	14.583333	364.94361	14.695833	365.34099	14.808333	365.73783
14.475	364.56046	14.5875	364.95834	14.7	365.35569	14.8125	365.75252
14.479167	364.57521	14.591667	364.97307	14.704167	365.3704	14.816667	365.7672
14.483333	364.58995	14.595833	364.98779	14.708333	365.3851	14.820833	365.78189
14.4875	364.60469	14.6	365.00252	14.7125	365.39981	14.825	365.79657
14.491667	364.61944	14.604167	365.01724	14.716667	365.41451	14.829167	365.81126
14.495833	364.63418	14.608333	365.03196	14.720833	365.42922	14.833333	365.82594
14.5	364.64892	14.6125	365.04669	14.725	365.44392	14.8375	365.84063
14.504167	364.66366	14.616667	365.06141	14.729167	365.45862	14.841667	365.85531

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
15.745833	369.02429	15.858333	369.4162	15.970833	369.80759	16.083333	370.19845
15.75	369.03882	15.8625	369.43071	15.975	369.82207	16.0875	370.21291
15.754167	369.05334	15.866667	369.44521	15.979167	369.83656	16.091667	370.22738
15.758333	369.06786	15.870833	369.45972	15.983333	369.85104	16.095833	370.24184
15.7625	369.08239	15.875	369.47422	15.9875	369.86553	16.1	370.25631
15.766667	369.09691	15.879167	369.48872	15.991667	369.88001	16.104167	370.27077
15.770833	369.11143	15.883333	369.50322	15.995833	369.89449	16.108333	370.28523
15.775	369.12595	15.8875	369.51772	16	369.90897	16.1125	370.2997
15.779167	369.14047	15.891667	369.53222	16.004167	369.92345	16.116667	370.31416
15.783333	369.15499	15.895833	369.54672	16.008333	369.93793	16.120833	370.32862
15.7875	369.16951	15.9	369.56122	16.0125	369.95241	16.125	370.34308
15.791667	369.18402	15.904167	369.57572	16.016667	369.96689	16.129167	370.35754
15.795833	369.19854	15.908333	369.59022	16.020833	369.98137	16.133333	370.37199
15.8	369.21306	15.9125	369.60471	16.025	369.99585	16.1375	370.38645
15.804167	369.22757	15.916667	369.61921	16.029167	370.01032	16.141667	370.40091
15.808333	369.24209	15.920833	369.6337	16.033333	370.0248	16.145833	370.41536
15.8125	369.2566	15.925	369.6482	16.0375	370.03927	16.15	370.42982
15.816667	369.27111	15.929167	369.66269	16.041667	370.05375	16.154167	370.44427
15.820833	369.28563	15.933333	369.67719	16.045833	370.06822	16.158333	370.45873
15.825	369.30014	15.9375	369.69168	16.05	370.08269	16.1625	370.47318
15.829167	369.31465	15.941667	369.70617	16.054167	370.09716	16.166667	370.48763
15.833333	369.32916	15.945833	369.72066	16.058333	370.11164	16.170833	370.50208
15.8375	369.34367	15.95	369.73515	16.0625	370.12611	16.175	370.51654
15.841667	369.35818	15.954167	369.74964	16.066667	370.14058	16.179167	370.53099
15.845833	369.37268	15.958333	369.76413	16.070833	370.15504	16.183333	370.54544
15.85	369.38719	15.9625	369.77862	16.075	370.16951	16.1875	370.55988
15.854167	369.4017	15.966667	369.7931	16.079167	370.18398	16.191667	370.57433

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
16.195833	370.58878	16.308333	370.97859	16.420833	371.36787	16.533333	371.75662
16.2	370.60323	16.3125	370.99301	16.425	371.38228	16.5375	371.77101
16.204167	370.61767	16.316667	371.00744	16.429167	371.39668	16.541667	371.7854
16.208333	370.63212	16.320833	371.02187	16.433333	371.41109	16.545833	371.79979
16.2125	370.64656	16.325	371.03629	16.4375	371.42549	16.55	371.81417
16.216667	370.66101	16.329167	371.05072	16.441667	371.4399	16.554167	371.82856
16.220833	370.67545	16.333333	371.06514	16.445833	371.4543	16.558333	371.84294
16.225	370.68989	16.3375	371.07956	16.45	371.46871	16.5625	371.85733
16.229167	370.70433	16.341667	371.09398	16.454167	371.48311	16.566667	371.87171
16.233333	370.71877	16.345833	371.10841	16.458333	371.49751	16.570833	371.88609
16.2375	370.73321	16.35	371.12283	16.4625	371.51191	16.575	371.90048
16.241667	370.74765	16.354167	371.13725	16.466667	371.52631	16.579167	371.91486
16.245833	370.76209	16.358333	371.15167	16.470833	371.54071	16.583333	371.92924
16.25	370.77653	16.3625	371.16608	16.475	371.55511	16.5875	371.94362
16.254167	370.79097	16.366667	371.1805	16.479167	371.56951	16.591667	371.958
16.258333	370.8054	16.370833	371.19492	16.483333	371.58391	16.595833	371.97237
16.2625	370.81984	16.375	371.20934	16.4875	371.59831	16.6	371.98675
16.266667	370.83427	16.379167	371.22375	16.491667	371.6127	16.604167	372.00113
16.270833	370.84871	16.383333	371.23817	16.495833	371.6271	16.608333	372.0155
16.275	370.86314	16.3875	371.25258	16.5	371.64149	16.6125	372.02988
16.279167	370.87758	16.391667	371.26699	16.504167	371.65589	16.616667	372.04425
16.283333	370.89201	16.395833	371.28141	16.508333	371.67028	16.620833	372.05863
16.2875	370.90644	16.4	371.29582	16.5125	371.68467	16.625	372.073
16.291667	370.92087	16.404167	371.31023	16.516667	371.69906	16.629167	372.08737
16.295833	370.9353	16.408333	371.32464	16.520833	371.71346	16.633333	372.10175
16.3	370.94973	16.4125	371.33905	16.525	371.72785	16.6375	372.11612
16.304167	370.96416	16.416667	371.35346	16.529167	371.74224	16.641667	372.13049

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
17.545833	373.71445	17.658333	373.82234	17.770833	373.93086	17.883333	374.04002
17.55	373.71844	17.6625	373.82634	17.775	373.93489	17.8875	374.04408
17.554167	373.72242	17.666667	373.83035	17.779167	373.93892	17.891667	374.04813
17.558333	373.72641	17.670833	373.83436	17.783333	373.94296	17.895833	374.05219
17.5625	373.7304	17.675	373.83837	17.7875	373.94699	17.9	374.05625
17.566667	373.73438	17.679167	373.84239	17.791667	373.95103	17.904167	374.06031
17.570833	373.73837	17.683333	373.8464	17.795833	373.95506	17.908333	374.06437
17.575	373.74236	17.6875	373.85041	17.8	373.9591	17.9125	374.06843
17.579167	373.74635	17.691667	373.85443	17.804167	373.96314	17.916667	374.07249
17.583333	373.75034	17.695833	373.85844	17.808333	373.96718	17.920833	374.07655
17.5875	373.75434	17.7	373.86246	17.8125	373.97122	17.925	374.08061
17.591667	373.75833	17.704167	373.86647	17.816667	373.97526	17.929167	374.08468
17.595833	373.76232	17.708333	373.87049	17.820833	373.9793	17.933333	374.08874
17.6	373.76632	17.7125	373.87451	17.825	373.98334	17.9375	374.09281
17.604167	373.77031	17.716667	373.87853	17.829167	373.98738	17.941667	374.09687
17.608333	373.77431	17.720833	373.88255	17.833333	373.99143	17.945833	374.10094
17.6125	373.77831	17.725	373.88657	17.8375	373.99547	17.95	374.10501
17.616667	373.78231	17.729167	373.89059	17.841667	373.99952	17.954167	374.10908
17.620833	373.7863	17.733333	373.89462	17.845833	374.00356	17.958333	374.11315
17.625	373.7903	17.7375	373.89864	17.85	374.00761	17.9625	374.11722
17.629167	373.79431	17.741667	373.90266	17.854167	374.01166	17.966667	374.12129
17.633333	373.79831	17.745833	373.90669	17.858333	374.01571	17.970833	374.12536
17.6375	373.80231	17.75	373.91072	17.8625	374.01976	17.975	374.12944
17.641667	373.80631	17.754167	373.91474	17.866667	374.02381	17.979167	374.13351
17.645833	373.81032	17.758333	373.91877	17.870833	374.02786	17.983333	374.13759
17.65	373.81432	17.7625	373.9228	17.875	374.03191	17.9875	374.14166
17.654167	373.81833	17.766667	373.92683	17.879167	374.03597	17.991667	374.14574

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
17.995833	374.14982	18.108333	374.26024	18.220833	374.3713	18.333333	374.48298
18	374.1539	18.1125	374.26434	18.225	374.37542	18.3375	374.48713
18.004167	374.15797	18.116667	374.26845	18.229167	374.37955	18.341667	374.49127
18.008333	374.16205	18.120833	374.27255	18.233333	374.38368	18.345833	374.49542
18.0125	374.16614	18.125	374.27666	18.2375	374.3878	18.35	374.49958
18.016667	374.17022	18.129167	374.28076	18.241667	374.39193	18.354167	374.50373
18.020833	374.1743	18.133333	374.28487	18.245833	374.39606	18.358333	374.50788
18.025	374.17838	18.1375	374.28897	18.25	374.40019	18.3625	374.51203
18.029167	374.18247	18.141667	374.29308	18.254167	374.40432	18.366667	374.51619
18.033333	374.18656	18.145833	374.29719	18.258333	374.40845	18.370833	374.52034
18.0375	374.19064	18.15	374.3013	18.2625	374.41259	18.375	374.5245
18.041667	374.19473	18.154167	374.30541	18.266667	374.41672	18.379167	374.52866
18.045833	374.19882	18.158333	374.30952	18.270833	374.42086	18.383333	374.53281
18.05	374.20291	18.1625	374.31364	18.275	374.42499	18.3875	374.53697
18.054167	374.207	18.166667	374.31775	18.279167	374.42913	18.391667	374.54113
18.058333	374.21109	18.170833	374.32186	18.283333	374.43326	18.395833	374.54529
18.0625	374.21518	18.175	374.32598	18.2875	374.4374	18.4	374.54945
18.066667	374.21927	18.179167	374.33009	18.291667	374.44154	18.404167	374.55361
18.070833	374.22336	18.183333	374.33421	18.295833	374.44568	18.408333	374.55778
18.075	374.22746	18.1875	374.33833	18.3	374.44982	18.4125	374.56194
18.079167	374.23155	18.191667	374.34245	18.304167	374.45396	18.416667	374.56611
18.083333	374.23565	18.195833	374.34656	18.308333	374.45811	18.420833	374.57027
18.0875	374.23975	18.2	374.35068	18.3125	374.46225	18.425	374.57444
18.091667	374.24384	18.204167	374.35481	18.316667	374.46639	18.429167	374.5786
18.095833	374.24794	18.208333	374.35893	18.320833	374.47054	18.433333	374.58277
18.1	374.25204	18.2125	374.36305	18.325	374.47468	18.4375	374.58694
18.104167	374.25614	18.216667	374.36717	18.329167	374.47883	18.441667	374.59111

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
20.245833	376.4745	20.358333	376.59696	20.470833	376.71999	20.583333	376.84359
20.25	376.47903	20.3625	376.60151	20.475	376.72456	20.5875	376.84818
20.254167	376.48356	20.366667	376.60606	20.479167	376.72913	20.591667	376.85277
20.258333	376.48808	20.370833	376.6106	20.483333	376.7337	20.595833	376.85736
20.2625	376.49261	20.375	376.61515	20.4875	376.73827	20.6	376.86195
20.266667	376.49714	20.379167	376.6197	20.491667	376.74284	20.604167	376.86654
20.270833	376.50167	20.383333	376.62425	20.495833	376.74741	20.608333	376.87114
20.275	376.5062	20.3875	376.6288	20.5	376.75198	20.6125	376.87573
20.279167	376.51073	20.391667	376.63336	20.504167	376.75656	20.616667	376.88032
20.283333	376.51526	20.395833	376.63791	20.508333	376.76113	20.620833	376.88492
20.2875	376.51979	20.4	376.64246	20.5125	376.7657	20.625	376.88951
20.291667	376.52433	20.404167	376.64702	20.516667	376.77028	20.629167	376.89411
20.295833	376.52886	20.408333	376.65157	20.520833	376.77486	20.633333	376.89871
20.3	376.53339	20.4125	376.65613	20.525	376.77943	20.6375	376.90331
20.304167	376.53793	20.416667	376.66068	20.529167	376.78401	20.641667	376.9079
20.308333	376.54247	20.420833	376.66524	20.533333	376.78859	20.645833	376.9125
20.3125	376.547	20.425	376.6698	20.5375	376.79317	20.65	376.9171
20.316667	376.55154	20.429167	376.67436	20.541667	376.79775	20.654167	376.92171
20.320833	376.55608	20.433333	376.67892	20.545833	376.80233	20.658333	376.92631
20.325	376.56062	20.4375	376.68348	20.55	376.80691	20.6625	376.93091
20.329167	376.56516	20.441667	376.68804	20.554167	376.81149	20.666667	376.93551
20.333333	376.5697	20.445833	376.6926	20.558333	376.81608	20.670833	376.94012
20.3375	376.57424	20.45	376.69717	20.5625	376.82066	20.675	376.94472
20.341667	376.57878	20.454167	376.70173	20.566667	376.82525	20.679167	376.94933
20.345833	376.58333	20.458333	376.70629	20.570833	376.82983	20.683333	376.95393
20.35	376.58787	20.4625	376.71086	20.575	376.83442	20.6875	376.95854
20.354167	376.59242	20.466667	376.71543	20.579167	376.839	20.691667	376.96315

ตารางผนวกข. 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
20.695833	376.96776	20.808333	377.09249	20.920833	377.21778	21.033333	377.34363
20.7	376.97237	20.8125	377.09712	20.925	377.22243	21.0375	377.34831
20.704167	376.97698	20.816667	377.10175	20.929167	377.22709	21.041667	377.35298
20.708333	376.98159	20.820833	377.10638	20.933333	377.23174	21.045833	377.35765
20.7125	376.9862	20.825	377.11102	20.9375	377.23639	21.05	377.36233
20.716667	376.99081	20.829167	377.11565	20.941667	377.24105	21.054167	377.367
20.720833	376.99543	20.833333	377.12028	20.945833	377.2457	21.058333	377.37168
20.725	377.00004	20.8375	377.12492	20.95	377.25036	21.0625	377.37635
20.729167	377.00466	20.841667	377.12956	20.954167	377.25501	21.066667	377.38103
20.733333	377.00927	20.845833	377.13419	20.958333	377.25967	21.070833	377.38571
20.7375	377.01389	20.85	377.13883	20.9625	377.26433	21.075	377.39039
20.741667	377.01851	20.854167	377.14347	20.966667	377.26899	21.079167	377.39507
20.745833	377.02313	20.858333	377.14811	20.970833	377.27365	21.083333	377.39975
20.75	377.02774	20.8625	377.15275	20.975	377.27831	21.0875	377.40443
20.754167	377.03236	20.866667	377.15739	20.979167	377.28297	21.091667	377.40911
20.758333	377.03698	20.870833	377.16203	20.983333	377.28763	21.095833	377.41379
20.7625	377.04161	20.875	377.16667	20.9875	377.29229	21.1	377.41848
20.766667	377.04623	20.879167	377.17131	20.991667	377.29696	21.104167	377.42316
20.770833	377.05085	20.883333	377.17596	20.995833	377.30162	21.108333	377.42784
20.775	377.05547	20.8875	377.1806	21	377.30629	21.1125	377.43253
20.779167	377.0601	20.891667	377.18525	21.004167	377.31095	21.116667	377.43722
20.783333	377.06472	20.895833	377.18989	21.008333	377.31562	21.120833	377.4419
20.7875	377.06935	20.9	377.19454	21.0125	377.32029	21.125	377.44659
20.791667	377.07398	20.904167	377.19919	21.016667	377.32495	21.129167	377.45128
20.795833	377.0786	20.908333	377.20383	21.020833	377.32962	21.133333	377.45597
20.8	377.08323	20.9125	377.20848	21.025	377.33429	21.1375	377.46066
20.804167	377.08786	20.916667	377.21313	21.029167	377.33896	21.141667	377.46535

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
22.495833	379.02935	22.608333	379.16274	22.720833	379.29666	22.833333	379.43109
22.5	379.03428	22.6125	379.16769	22.725	379.30163	22.8375	379.43608
22.504167	379.03921	22.616667	379.17264	22.729167	379.3066	22.841667	379.44107
22.508333	379.04414	22.620833	379.1776	22.733333	379.31157	22.845833	379.44606
22.5125	379.04908	22.625	379.18255	22.7375	379.31654	22.85	379.45105
22.516667	379.05401	22.629167	379.1875	22.741667	379.32152	22.854167	379.45605
22.520833	379.05894	22.633333	379.19246	22.745833	379.32649	22.858333	379.46104
22.525	379.06388	22.6375	379.19741	22.75	379.33146	22.8625	379.46603
22.529167	379.06882	22.641667	379.20237	22.754167	379.33644	22.866667	379.47102
22.533333	379.07375	22.645833	379.20732	22.758333	379.34141	22.870833	379.47602
22.5375	379.07869	22.65	379.21228	22.7625	379.34639	22.875	379.48101
22.541667	379.08363	22.654167	379.21724	22.766667	379.35137	22.879167	379.48601
22.545833	379.08857	22.658333	379.2222	22.770833	379.35634	22.883333	379.49101
22.55	379.09351	22.6625	379.22716	22.775	379.36132	22.8875	379.496
22.554167	379.09845	22.666667	379.23212	22.779167	379.3663	22.891667	379.501
22.558333	379.10339	22.670833	379.23708	22.783333	379.37128	22.895833	379.506
22.5625	379.10833	22.675	379.24204	22.7875	379.37626	22.9	379.511
22.566667	379.11328	22.679167	379.247	22.791667	379.38124	22.904167	379.516
22.570833	379.11822	22.683333	379.25196	22.795833	379.38622	22.908333	379.521
22.575	379.12316	22.6875	379.25693	22.8	379.39121	22.9125	379.526
22.579167	379.12811	22.691667	379.26189	22.804167	379.39619	22.916667	379.53101
22.583333	379.13305	22.695833	379.26686	22.808333	379.40117	22.920833	379.53601
22.5875	379.138	22.7	379.27182	22.8125	379.40616	22.925	379.54101
22.591667	379.14295	22.704167	379.27679	22.816667	379.41114	22.929167	379.54602
22.595833	379.1479	22.708333	379.28175	22.820833	379.41613	22.933333	379.55102
22.6	379.15284	22.7125	379.28672	22.825	379.42112	22.9375	379.55603
22.604167	379.15779	22.716667	379.29169	22.829167	379.42611	22.941667	379.56103

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K(ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
22.945833	379.56604	23.058333	379.7015	23.170833	379.83747	23.283333	379.97395
22.95	379.57105	23.0625	379.70653	23.175	379.84252	23.2875	379.97901
22.954167	379.57606	23.066667	379.71156	23.179167	379.84756	23.291667	379.98408
22.958333	379.58107	23.070833	379.71658	23.183333	379.85261	23.295833	379.98914
22.9625	379.58608	23.075	379.72161	23.1875	379.85766	23.3	379.99421
22.966667	379.59109	23.079167	379.72664	23.191667	379.86271	23.304167	379.99927
22.970833	379.5961	23.083333	379.73167	23.195833	379.86775	23.308333	380.00434
22.975	379.60111	23.0875	379.7367	23.2	379.8728	23.3125	380.00941
22.979167	379.60612	23.091667	379.74174	23.204167	379.87785	23.316667	380.01448
22.983333	379.61114	23.095833	379.74677	23.208333	379.88291	23.320833	380.01955
22.9875	379.61615	23.1	379.7518	23.2125	379.88796	23.325	380.02462
22.991667	379.62117	23.104167	379.75683	23.216667	379.89301	23.329167	380.02969
22.995833	379.62618	23.108333	379.76187	23.220833	379.89806	23.333333	380.03476
23	379.6312	23.1125	379.7669	23.225	379.90312	23.3375	380.03984
23.004167	379.63622	23.116667	379.77194	23.229167	379.90817	23.341667	380.04491
23.008333	379.64123	23.120833	379.77698	23.233333	379.91323	23.345833	380.04998
23.0125	379.64625	23.125	379.78201	23.2375	379.91828	23.35	380.05506
23.016667	379.65127	23.129167	379.78705	23.241667	379.92334	23.354167	380.06013
23.020833	379.65629	23.133333	379.79209	23.245833	379.9284	23.358333	380.06521
23.025	379.66131	23.1375	379.79713	23.25	379.93346	23.3625	380.07029
23.029167	379.66633	23.141667	379.80217	23.254167	379.93851	23.366667	380.07536
23.033333	379.67136	23.145833	379.80721	23.258333	379.94357	23.370833	380.08044
23.0375	379.67638	23.15	379.81225	23.2625	379.94863	23.375	380.08552
23.041667	379.6814	23.154167	379.81729	23.266667	379.9537	23.379167	380.0906
23.045833	379.68643	23.158333	379.82234	23.270833	379.95876	23.383333	380.09568
23.05	379.69145	23.1625	379.82738	23.275	379.96382	23.3875	380.10076
23.054167	379.69648	23.166667	379.83243	23.279167	379.96888	23.391667	380.10584

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
23.845833	380.66411	23.958333	380.80371	24.070833	380.94383	24.183333	381.08447
23.85	380.66927	23.9625	380.80889	24.075	380.94903	24.1875	381.08969
23.854167	380.67443	23.966667	380.81408	24.079167	380.95423	24.191667	381.09491
23.858333	380.6796	23.970833	380.81926	24.083333	380.95944	24.195833	381.10013
23.8625	380.68476	23.975	380.82444	24.0875	380.96464	24.2	381.10535
23.866667	380.68992	23.979167	380.82962	24.091667	380.96984	24.204167	381.11057
23.870833	380.69509	23.983333	380.83481	24.095833	380.97504	24.208333	381.11579
23.875	380.70025	23.9875	380.83999	24.1	380.98025	24.2125	381.12102
23.879167	380.70542	23.991667	380.84518	24.104167	380.98545	24.216667	381.12624
23.883333	380.71059	23.995833	380.85036	24.108333	380.99066	24.220833	381.13146
23.8875	380.71576	24	380.85555	24.1125	380.99586	24.225	381.13669
23.891667	380.72092	24.004167	380.86074	24.116667	381.00107	24.229167	381.14191
23.895833	380.72609	24.008333	380.86593	24.120833	381.00628	24.233333	381.14714
23.9	380.73126	24.0125	380.87112	24.125	381.01148	24.2375	381.15237
23.904167	380.73643	24.016667	380.8763	24.129167	381.01669	24.241667	381.15759
23.908333	380.7416	24.020833	380.8815	24.133333	381.0219	24.245833	381.16282
23.9125	380.74678	24.025	380.88669	24.1375	381.02711	24.25	381.16805
23.916667	380.75195	24.029167	380.89188	24.141667	381.03232	24.254167	381.17328
23.920833	380.75712	24.033333	380.89707	24.145833	381.03753	24.258333	381.17851
23.925	380.7623	24.0375	380.90226	24.15	381.04275	24.2625	381.18374
23.929167	380.76747	24.041667	380.90746	24.154167	381.04796	24.266667	381.18898
23.933333	380.77265	24.045833	380.91265	24.158333	381.05317	24.270833	381.19421
23.9375	380.77782	24.05	380.91785	24.1625	381.05839	24.275	381.19944
23.941667	380.783	24.054167	380.92304	24.166667	381.0636	24.279167	381.20468
23.945833	380.78818	24.058333	380.92824	24.170833	381.06882	24.283333	381.20991
23.95	380.79336	24.0625	380.93344	24.175	381.07404	24.2875	381.21515
23.954167	380.79853	24.066667	380.93864	24.179167	381.07925	24.291667	381.22038

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
24.295833	381.22562	24.408333	381.36728	24.520833	381.50945	24.633333	381.65212
24.3	381.23086	24.4125	381.37254	24.525	381.51472	24.6375	381.65741
24.304167	381.2361	24.416667	381.37779	24.529167	381.52	24.641667	381.66271
24.308333	381.24133	24.420833	381.38305	24.533333	381.52527	24.645833	381.668
24.3125	381.24657	24.425	381.38831	24.5375	381.53055	24.65	381.6733
24.316667	381.25181	24.429167	381.39357	24.541667	381.53583	24.654167	381.6786
24.320833	381.25706	24.433333	381.39883	24.545833	381.54111	24.658333	381.68389
24.325	381.2623	24.4375	381.40409	24.55	381.54639	24.6625	381.68919
24.329167	381.26754	24.441667	381.40935	24.554167	381.55167	24.666667	381.69449
24.333333	381.27278	24.445833	381.41461	24.558333	381.55695	24.670833	381.69979
24.3375	381.27803	24.45	381.41987	24.5625	381.56223	24.675	381.70509
24.341667	381.28327	24.454167	381.42514	24.566667	381.56751	24.679167	381.71039
24.345833	381.28852	24.458333	381.4304	24.570833	381.57279	24.683333	381.71569
24.35	381.29376	24.4625	381.43567	24.575	381.57808	24.6875	381.72099
24.354167	381.29901	24.466667	381.44093	24.579167	381.58336	24.691667	381.7263
24.358333	381.30426	24.470833	381.4462	24.583333	381.58865	24.695833	381.7316
24.3625	381.3095	24.475	381.45147	24.5875	381.59393	24.7	381.7369
24.366667	381.31475	24.479167	381.45673	24.591667	381.59922	24.704167	381.74221
24.370833	381.32	24.483333	381.462	24.595833	381.60451	24.708333	381.74752
24.375	381.32525	24.4875	381.46727	24.6	381.60979	24.7125	381.75282
24.379167	381.3305	24.491667	381.47254	24.604167	381.61508	24.716667	381.75813
24.383333	381.33575	24.495833	381.47781	24.608333	381.62037	24.720833	381.76344
24.3875	381.34101	24.5	381.48308	24.6125	381.62566	24.725	381.76874
24.391667	381.34626	24.504167	381.48835	24.616667	381.63095	24.729167	381.77405
24.395833	381.35151	24.508333	381.49363	24.620833	381.63624	24.733333	381.77936
24.4	381.35677	24.5125	381.4989	24.625	381.64153	24.7375	381.78467
24.404167	381.36202	24.516667	381.50417	24.629167	381.64683	24.741667	381.78998

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
24.745833	381.7953	24.858333	381.93897	24.970833	382.08315	25.083333	382.22782
24.75	381.80061	24.8625	381.94431	24.975	382.0885	25.0875	382.23319
24.754167	381.80592	24.866667	381.94964	24.979167	382.09385	25.091667	382.23856
24.758333	381.81124	24.870833	381.95497	24.983333	382.0992	25.095833	382.24393
24.7625	381.81655	24.875	381.9603	24.9875	382.10455	25.1	382.2493
24.766667	381.82187	24.879167	381.96564	24.991667	382.1099	25.104167	382.25467
24.770833	381.82718	24.883333	381.97097	24.995833	382.11526	25.108333	382.26004
24.775	381.8325	24.8875	381.97631	25	382.12061	25.1125	382.26541
24.779167	381.83782	24.891667	381.98164	25.004167	382.12596	25.116667	382.27078
24.783333	381.84313	24.895833	381.98698	25.008333	382.13132	25.120833	382.27616
24.7875	381.84845	24.9	381.99231	25.0125	382.13668	25.125	382.28153
24.791667	381.85377	24.904167	381.99765	25.016667	382.14203	25.129167	382.28691
24.795833	381.85909	24.908333	382.00299	25.020833	382.14739	25.133333	382.29228
24.8	381.86441	24.9125	382.00833	25.025	382.15275	25.1375	382.29766
24.804167	381.86973	24.916667	382.01367	25.029167	382.1581	25.141667	382.30303
24.808333	381.87506	24.920833	382.01901	25.033333	382.16346	25.145833	382.30841
24.8125	381.88038	24.925	382.02435	25.0375	382.16882	25.15	382.31379
24.816667	381.8857	24.929167	382.02969	25.041667	382.17418	25.154167	382.31917
24.820833	381.89103	24.933333	382.03504	25.045833	382.17954	25.158333	382.32455
24.825	381.89635	24.9375	382.04038	25.05	382.18491	25.1625	382.32993
24.829167	381.90168	24.941667	382.04572	25.054167	382.19027	25.166667	382.33531
24.833333	381.907	24.945833	382.05107	25.058333	382.19563	25.170833	382.34069
24.8375	381.91233	24.95	382.05641	25.0625	382.20099	25.175	382.34607
24.841667	381.91766	24.954167	382.06176	25.066667	382.20636	25.179167	382.35145
24.845833	381.92299	24.958333	382.06711	25.070833	382.21172	25.183333	382.35684
24.85	381.92831	24.9625	382.07245	25.075	382.21709	25.1875	382.36222
24.854167	381.93364	24.966667	382.0778	25.079167	382.22246	25.191667	382.3676

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
25.195833	382.37299	25.308333	382.51865	25.420833	382.66479	25.533333	382.81143
25.2	382.37838	25.3125	382.52405	25.425	382.67022	25.5375	382.81687
25.204167	382.38376	25.316667	382.52946	25.429167	382.67564	25.541667	382.82231
25.208333	382.38915	25.320833	382.53486	25.433333	382.68106	25.545833	382.82775
25.2125	382.39454	25.325	382.54027	25.4375	382.68649	25.55	382.83319
25.216667	382.39993	25.329167	382.54567	25.441667	382.69191	25.554167	382.83864
25.220833	382.40532	25.333333	382.55108	25.445833	382.69734	25.558333	382.84408
25.225	382.41071	25.3375	382.55649	25.45	382.70276	25.5625	382.84952
25.229167	382.4161	25.341667	382.5619	25.454167	382.70819	25.566667	382.85497
25.233333	382.42149	25.345833	382.56731	25.458333	382.71362	25.570833	382.86041
25.2375	382.42688	25.35	382.57272	25.4625	382.71905	25.575	382.86586
25.241667	382.43227	25.354167	382.57813	25.466667	382.72448	25.579167	382.87131
25.245833	382.43767	25.358333	382.58354	25.470833	382.72991	25.583333	382.87675
25.25	382.44306	25.3625	382.58895	25.475	382.73534	25.5875	382.8822
25.254167	382.44845	25.366667	382.59437	25.479167	382.74077	25.591667	382.88765
25.258333	382.45385	25.370833	382.59978	25.483333	382.7462	25.595833	382.8931
25.2625	382.45925	25.375	382.60519	25.4875	382.75163	25.6	382.89855
25.266667	382.46464	25.379167	382.61061	25.491667	382.75706	25.604167	382.904
25.270833	382.47004	25.383333	382.61602	25.495833	382.7625	25.608333	382.90945
25.275	382.47544	25.3875	382.62144	25.5	382.76793	25.6125	382.91491
25.279167	382.48084	25.391667	382.62686	25.504167	382.77337	25.616667	382.92036
25.283333	382.48624	25.395833	382.63228	25.508333	382.7788	25.620833	382.92581
25.2875	382.49164	25.4	382.63769	25.5125	382.78424	25.625	382.93127
25.291667	382.49704	25.404167	382.64311	25.516667	382.78967	25.629167	382.93672
25.295833	382.50244	25.408333	382.64853	25.520833	382.79511	25.633333	382.94218
25.3	382.50784	25.4125	382.65395	25.525	382.80055	25.6375	382.94763
25.304167	382.51324	25.416667	382.65937	25.529167	382.80599	25.641667	382.95309

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
25.645833	382.95855	25.758333	383.10615	25.870833	383.25423	25.983333	383.40279
25.65	382.964	25.7625	383.11162	25.875	383.25972	25.9875	383.4083
25.654167	382.96946	25.766667	383.1171	25.879167	383.26521	25.991667	383.41381
25.658333	382.97492	25.770833	383.12258	25.883333	383.27071	25.995833	383.41932
25.6625	382.98038	25.775	383.12805	25.8875	383.27621	26	383.42483
25.666667	382.98584	25.779167	383.13353	25.891667	383.2817	26.004167	383.43035
25.670833	382.9913	25.783333	383.13901	25.895833	383.2872	26.008333	383.43586
25.675	382.99677	25.7875	383.14449	25.9	383.2927	26.0125	383.44138
25.679167	383.00223	25.791667	383.14997	25.904167	383.29819	26.016667	383.44689
25.683333	383.00769	25.795833	383.15545	25.908333	383.30369	26.020833	383.45241
25.6875	383.01316	25.8	383.16094	25.9125	383.30919	26.025	383.45793
25.691667	383.01862	25.804167	383.16642	25.916667	383.31469	26.029167	383.46345
25.695833	383.02409	25.808333	383.1719	25.920833	383.32019	26.033333	383.46896
25.7	383.02955	25.8125	383.17738	25.925	383.3257	26.0375	383.47448
25.704167	383.03502	25.816667	383.18287	25.929167	383.3312	26.041667	383.48
25.708333	383.04049	25.820833	383.18835	25.933333	383.3367	26.045833	383.48552
25.7125	383.04596	25.825	383.19384	25.9375	383.3422	26.05	383.49104
25.716667	383.05142	25.829167	383.19933	25.941667	383.34771	26.054167	383.49657
25.720833	383.05689	25.833333	383.20481	25.945833	383.35321	26.058333	383.50209
25.725	383.06236	25.8375	383.2103	25.95	383.35872	26.0625	383.50761
25.729167	383.06783	25.841667	383.21579	25.954167	383.36422	26.066667	383.51314
25.733333	383.07331	25.845833	383.22128	25.958333	383.36973	26.070833	383.51866
25.7375	383.07878	25.85	383.22677	25.9625	383.37524	26.075	383.52418
25.741667	383.08425	25.854167	383.23226	25.966667	383.38075	26.079167	383.52971
25.745833	383.08972	25.858333	383.23775	25.970833	383.38626	26.083333	383.53524
25.75	383.0952	25.8625	383.24324	25.975	383.39176	26.0875	383.54076
25.754167	383.10067	25.866667	383.24873	25.979167	383.39727	26.091667	383.54629

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
26.095833	383.55182	26.208333	383.70133	26.320833	383.85131	26.433333	384.00175
26.1	383.55735	26.2125	383.70687	26.325	383.85687	26.4375	384.00734
26.104167	383.56288	26.216667	383.71242	26.329167	383.86243	26.441667	384.01292
26.108333	383.56841	26.220833	383.71797	26.333333	383.868	26.445833	384.0185
26.1125	383.57394	26.225	383.72352	26.3375	383.87357	26.45	384.02408
26.116667	383.57947	26.229167	383.72907	26.341667	383.87913	26.454167	384.02967
26.120833	383.585	26.233333	383.73462	26.345833	383.8847	26.458333	384.03525
26.125	383.59054	26.2375	383.74017	26.35	383.89027	26.4625	384.04084
26.129167	383.59607	26.241667	383.74572	26.354167	383.89583	26.466667	384.04642
26.133333	383.6016	26.245833	383.75127	26.358333	383.9014	26.470833	384.05201
26.1375	383.60714	26.25	383.75682	26.3625	383.90697	26.475	384.05759
26.141667	383.61267	26.254167	383.76237	26.366667	383.91254	26.479167	384.06318
26.145833	383.61821	26.258333	383.76793	26.370833	383.91811	26.483333	384.06877
26.15	383.62375	26.2625	383.77348	26.375	383.92369	26.4875	384.07436
26.154167	383.62928	26.266667	383.77904	26.379167	383.92926	26.491667	384.07995
26.158333	383.63482	26.270833	383.78459	26.383333	383.93483	26.495833	384.08554
26.1625	383.64036	26.275	383.79015	26.3875	383.9404	26.5	384.09113
26.166667	383.6459	26.279167	383.7957	26.391667	383.94598	26.504167	384.09672
26.170833	383.65144	26.283333	383.80126	26.395833	383.95155	26.508333	384.10231
26.175	383.65698	26.2875	383.80682	26.4	383.95713	26.5125	384.1079
26.179167	383.66252	26.291667	383.81238	26.404167	383.9627	26.516667	384.1135
26.183333	383.66806	26.295833	383.81794	26.408333	383.96828	26.520833	384.11909
26.1875	383.67361	26.3	383.8235	26.4125	383.97386	26.525	384.12469
26.191667	383.67915	26.304167	383.82906	26.416667	383.97944	26.529167	384.13028
26.195833	383.68469	26.308333	383.83462	26.420833	383.98501	26.533333	384.13588
26.2	383.69024	26.3125	383.84018	26.425	383.99059	26.5375	384.14147
26.204167	383.69578	26.316667	383.84574	26.429167	383.99617	26.541667	384.14707

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
26.545833	384.15267	26.658333	384.30405	26.770833	384.45589	26.883333	384.60819
26.55	384.15827	26.6625	384.30966	26.775	384.46152	26.8875	384.61384
26.554167	384.16387	26.666667	384.31528	26.779167	384.46715	26.891667	384.61949
26.558333	384.16947	26.670833	384.3209	26.783333	384.47279	26.895833	384.62514
26.5625	384.17507	26.675	384.32651	26.7875	384.47842	26.9	384.63079
26.566667	384.18067	26.679167	384.33213	26.791667	384.48406	26.904167	384.63644
26.570833	384.18627	26.683333	384.33775	26.795833	384.48969	26.908333	384.64209
26.575	384.19187	26.6875	384.34337	26.8	384.49533	26.9125	384.64775
26.579167	384.19747	26.691667	384.34899	26.804167	384.50097	26.916667	384.6534
26.583333	384.20308	26.695833	384.35461	26.808333	384.5066	26.920833	384.65906
26.5875	384.20868	26.7	384.36023	26.8125	384.51224	26.925	384.66471
26.591667	384.21429	26.704167	384.36585	26.816667	384.51788	26.929167	384.67037
26.595833	384.21989	26.708333	384.37147	26.820833	384.52352	26.933333	384.67602
26.6	384.2255	26.7125	384.3771	26.825	384.52916	26.9375	384.68168
26.604167	384.2311	26.716667	384.38272	26.829167	384.5348	26.941667	384.68734
26.608333	384.23671	26.720833	384.38835	26.833333	384.54044	26.945833	384.693
26.6125	384.24232	26.725	384.39397	26.8375	384.54608	26.95	384.69866
26.616667	384.24793	26.729167	384.3996	26.841667	384.55173	26.954167	384.70432
26.620833	384.25354	26.733333	384.40522	26.845833	384.55737	26.958333	384.70998
26.625	384.25915	26.7375	384.41085	26.85	384.56301	26.9625	384.71564
26.629167	384.26476	26.741667	384.41648	26.854167	384.56866	26.966667	384.7213
26.633333	384.27037	26.745833	384.42211	26.858333	384.5743	26.970833	384.72696
26.6375	384.27598	26.75	384.42773	26.8625	384.57995	26.975	384.73262
26.641667	384.28159	26.754167	384.43336	26.866667	384.5856	26.979167	384.73829
26.645833	384.2872	26.758333	384.43899	26.870833	384.59124	26.983333	384.74395
26.65	384.29282	26.7625	384.44462	26.875	384.59689	26.9875	384.74961
26.654167	384.29843	26.766667	384.45026	26.879167	384.60254	26.991667	384.75528

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
26.995833	384.76095	27.108333	384.91416	27.220833	385.0678	27.333333	385.22186
27	384.76661	27.1125	384.91984	27.225	385.0735	27.3375	385.22757
27.004167	384.77228	27.116667	384.92552	27.229167	385.07919	27.341667	385.23328
27.008333	384.77795	27.120833	384.93121	27.233333	385.08489	27.345833	385.239
27.0125	384.78362	27.125	384.93689	27.2375	385.09059	27.35	385.24471
27.016667	384.78928	27.129167	384.94258	27.241667	385.0963	27.354167	385.25043
27.020833	384.79495	27.133333	384.94826	27.245833	385.102	27.358333	385.25615
27.025	384.80062	27.1375	384.95395	27.25	385.1077	27.3625	385.26186
27.029167	384.8063	27.141667	384.95964	27.254167	385.1134	27.366667	385.26758
27.033333	384.81197	27.145833	384.96532	27.258333	385.1191	27.370833	385.2733
27.0375	384.81764	27.15	384.97101	27.2625	385.12481	27.375	385.27902
27.041667	384.82331	27.154167	384.9767	27.266667	385.13051	27.379167	385.28474
27.045833	384.82898	27.158333	384.98239	27.270833	385.13622	27.383333	385.29046
27.05	384.83466	27.1625	384.98808	27.275	385.14192	27.3875	385.29618
27.054167	384.84033	27.166667	384.99377	27.279167	385.14763	27.391667	385.3019
27.058333	384.84601	27.170833	384.99946	27.283333	385.15333	27.395833	385.30762
27.0625	384.85168	27.175	385.00515	27.2875	385.15904	27.4	385.31335
27.066667	384.85736	27.179167	385.01084	27.291667	385.16475	27.404167	385.31907
27.070833	384.86304	27.183333	385.01654	27.295833	385.17046	27.408333	385.32479
27.075	384.86872	27.1875	385.02223	27.3	385.17617	27.4125	385.33052
27.079167	384.87439	27.191667	385.02792	27.304167	385.18187	27.416667	385.33624
27.083333	384.88007	27.195833	385.03362	27.308333	385.18758	27.420833	385.34197
27.0875	384.88575	27.2	385.03931	27.3125	385.19329	27.425	385.34769
27.091667	384.89143	27.204167	385.04501	27.316667	385.19901	27.429167	385.35342
27.095833	384.89711	27.208333	385.05071	27.320833	385.20472	27.433333	385.35914
27.1	384.90279	27.2125	385.0564	27.325	385.21043	27.4375	385.36487
27.104167	384.90848	27.216667	385.0621	27.329167	385.21614	27.441667	385.3706

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
27.445833	385.37633	27.558333	385.53122	27.670833	385.68652	27.783333	385.84222
27.45	385.38206	27.5625	385.53696	27.675	385.69227	27.7875	385.848
27.454167	385.38779	27.566667	385.54271	27.679167	385.69804	27.791667	385.85377
27.458333	385.39352	27.570833	385.54845	27.683333	385.7038	27.795833	385.85955
27.4625	385.39925	27.575	385.5542	27.6875	385.70956	27.8	385.86533
27.466667	385.40498	27.579167	385.55994	27.691667	385.71532	27.804167	385.8711
27.470833	385.41071	27.583333	385.56569	27.695833	385.72108	27.808333	385.87688
27.475	385.41645	27.5875	385.57144	27.7	385.72684	27.8125	385.88266
27.479167	385.42218	27.591667	385.57719	27.704167	385.73261	27.816667	385.88844
27.483333	385.42791	27.595833	385.58294	27.708333	385.73837	27.820833	385.89422
27.4875	385.43365	27.6	385.58869	27.7125	385.74414	27.825	385.9
27.491667	385.43938	27.604167	385.59444	27.716667	385.7499	27.829167	385.90578
27.495833	385.44512	27.608333	385.60019	27.720833	385.75567	27.833333	385.91156
27.5	385.45085	27.6125	385.60594	27.725	385.76143	27.8375	385.91734
27.504167	385.45659	27.616667	385.61169	27.729167	385.7672	27.841667	385.92312
27.508333	385.46233	27.620833	385.61744	27.733333	385.77297	27.845833	385.9289
27.5125	385.46806	27.625	385.6232	27.7375	385.77874	27.85	385.93469
27.516667	385.4738	27.629167	385.62895	27.741667	385.78451	27.854167	385.94047
27.520833	385.47954	27.633333	385.6347	27.745833	385.79027	27.858333	385.94625
27.525	385.48528	27.6375	385.64046	27.75	385.79604	27.8625	385.95204
27.529167	385.49102	27.641667	385.64621	27.754167	385.80181	27.866667	385.95782
27.533333	385.49676	27.645833	385.65197	27.758333	385.80759	27.870833	385.96361
27.5375	385.5025	27.65	385.65773	27.7625	385.81336	27.875	385.9694
27.541667	385.50824	27.654167	385.66348	27.766667	385.81913	27.879167	385.97518
27.545833	385.51399	27.658333	385.66924	27.770833	385.8249	27.883333	385.98097
27.55	385.51973	27.6625	385.675	27.775	385.83067	27.8875	385.98676
27.554167	385.52547	27.666667	385.68076	27.779167	385.83645	27.891667	385.99255

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
27.895833	385.99834	28.008333	386.15486	28.120833	386.31178	28.233333	386.4691
27.9	386.00413	28.0125	386.16066	28.125	386.3176	28.2375	386.47493
27.904167	386.00992	28.016667	386.16647	28.129167	386.32342	28.241667	386.48077
27.908333	386.01571	28.020833	386.17227	28.133333	386.32924	28.245833	386.4866
27.9125	386.0215	28.025	386.17808	28.1375	386.33506	28.25	386.49244
27.916667	386.02729	28.029167	386.18388	28.141667	386.34088	28.254167	386.49827
27.920833	386.03308	28.033333	386.18969	28.145833	386.3467	28.258333	386.50411
27.925	386.03888	28.0375	386.1955	28.15	386.35252	28.2625	386.50995
27.929167	386.04467	28.041667	386.20131	28.154167	386.35835	28.266667	386.51579
27.933333	386.05046	28.045833	386.20712	28.158333	386.36417	28.270833	386.52162
27.9375	386.05626	28.05	386.21293	28.1625	386.37	28.275	386.52746
27.941667	386.06205	28.054167	386.21874	28.166667	386.37582	28.279167	386.5333
27.945833	386.06785	28.058333	386.22455	28.170833	386.38165	28.283333	386.53914
27.95	386.07365	28.0625	386.23036	28.175	386.38747	28.2875	386.54498
27.954167	386.07944	28.066667	386.23617	28.179167	386.3933	28.291667	386.55083
27.958333	386.08524	28.070833	386.24198	28.183333	386.39913	28.295833	386.55667
27.9625	386.09104	28.075	386.2478	28.1875	386.40495	28.3	386.56251
27.966667	386.09684	28.079167	386.25361	28.191667	386.41078	28.304167	386.56835
27.970833	386.10264	28.083333	386.25942	28.195833	386.41661	28.308333	386.5742
27.975	386.10844	28.0875	386.26524	28.2	386.42244	28.3125	386.58004
27.979167	386.11424	28.091667	386.27105	28.204167	386.42827	28.316667	386.58589
27.983333	386.12004	28.095833	386.27687	28.208333	386.4341	28.320833	386.59173
27.9875	386.12584	28.1	386.28269	28.2125	386.43993	28.325	386.59758
27.991667	386.13164	28.104167	386.2885	28.216667	386.44576	28.329167	386.60342
27.995833	386.13744	28.108333	386.29432	28.220833	386.4516	28.333333	386.60927
28	386.14325	28.1125	386.30014	28.225	386.45743	28.3375	386.61512
28.004167	386.14905	28.116667	386.30596	28.229167	386.46326	28.341667	386.62097

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
28.345833	386.62681	28.458333	386.78493	28.570833	386.94343	28.683333	387.10233
28.35	386.63266	28.4625	386.79079	28.575	386.94931	28.6875	387.10822
28.354167	386.63851	28.466667	386.79665	28.579167	386.95519	28.691667	387.11411
28.358333	386.64436	28.470833	386.80252	28.583333	386.96107	28.695833	387.12001
28.3625	386.65021	28.475	386.80838	28.5875	386.96695	28.7	387.1259
28.366667	386.65606	28.479167	386.81425	28.591667	386.97283	28.704167	387.1318
28.370833	386.66192	28.483333	386.82012	28.595833	386.97871	28.708333	387.13769
28.375	386.66777	28.4875	386.82598	28.6	386.98459	28.7125	387.14359
28.379167	386.67362	28.491667	386.83185	28.604167	386.99047	28.716667	387.14948
28.383333	386.67947	28.495833	386.83772	28.608333	386.99635	28.720833	387.15538
28.3875	386.68533	28.5	386.84359	28.6125	387.00224	28.725	387.16128
28.391667	386.69118	28.504167	386.84946	28.616667	387.00812	28.729167	387.16718
28.395833	386.69704	28.508333	386.85532	28.620833	387.014	28.733333	387.17307
28.4	386.70289	28.5125	386.8612	28.625	387.01989	28.7375	387.17897
28.404167	386.70875	28.516667	386.86707	28.629167	387.02577	28.741667	387.18487
28.408333	386.71461	28.520833	386.87294	28.633333	387.03166	28.745833	387.19077
28.4125	386.72046	28.525	386.87881	28.6375	387.03755	28.75	387.19667
28.416667	386.72632	28.529167	386.88468	28.641667	387.04343	28.754167	387.20257
28.420833	386.73218	28.533333	386.89055	28.645833	387.04932	28.758333	387.20848
28.425	386.73804	28.5375	386.89643	28.65	387.05521	28.7625	387.21438
28.429167	386.7439	28.541667	386.9023	28.654167	387.0611	28.766667	387.22028
28.433333	386.74976	28.545833	386.90817	28.658333	387.06698	28.770833	387.22618
28.4375	386.75562	28.55	386.91405	28.6625	387.07287	28.775	387.23209
28.441667	386.76148	28.554167	386.91993	28.666667	387.07876	28.779167	387.23799
28.445833	386.76734	28.558333	386.9258	28.670833	387.08465	28.783333	387.2439
28.45	386.7732	28.5625	386.93168	28.675	387.09055	28.7875	387.2498
28.454167	386.77906	28.566667	386.93755	28.679167	387.09644	28.791667	387.25571

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
28.795833	387.26161	28.908333	387.42128	29.020833	387.58134	29.133333	387.74178
28.8	387.26752	28.9125	387.42721	29.025	387.58728	29.1375	387.74773
28.804167	387.27343	28.916667	387.43313	29.029167	387.59321	29.141667	387.75368
28.808333	387.27934	28.920833	387.43905	29.033333	387.59915	29.145833	387.75963
28.8125	387.28524	28.925	387.44497	29.0375	387.60508	29.15	387.76558
28.816667	387.29115	28.929167	387.4509	29.041667	387.61102	29.154167	387.77153
28.820833	387.29706	28.933333	387.45682	29.045833	387.61696	29.158333	387.77748
28.825	387.30297	28.9375	387.46274	29.05	387.6229	29.1625	387.78343
28.829167	387.30888	28.941667	387.46867	29.054167	387.62884	29.166667	387.78939
28.833333	387.31479	28.945833	387.47459	29.058333	387.63478	29.170833	387.79534
28.8375	387.32071	28.95	387.48052	29.0625	387.64072	29.175	387.80129
28.841667	387.32662	28.954167	387.48645	29.066667	387.64666	29.179167	387.80725
28.845833	387.33253	28.958333	387.49237	29.070833	387.6526	29.183333	387.8132
28.85	387.33844	28.9625	387.4983	29.075	387.65854	29.1875	387.81916
28.854167	387.34436	28.966667	387.50423	29.079167	387.66448	29.191667	387.82512
28.858333	387.35027	28.970833	387.51016	29.083333	387.67042	29.195833	387.83107
28.8625	387.35619	28.975	387.51609	29.0875	387.67637	29.2	387.83703
28.866667	387.3621	28.979167	387.52202	29.091667	387.68231	29.204167	387.84299
28.870833	387.36802	28.983333	387.52795	29.095833	387.68826	29.208333	387.84895
28.875	387.37393	28.9875	387.53388	29.1	387.6942	29.2125	387.8549
28.879167	387.37985	28.991667	387.53981	29.104167	387.70015	29.216667	387.86086
28.883333	387.38577	28.995833	387.54574	29.108333	387.70609	29.220833	387.86682
28.8875	387.39169	29	387.55167	29.1125	387.71204	29.225	387.87278
28.891667	387.39761	29.004167	387.5576	29.116667	387.71798	29.229167	387.87874
28.895833	387.40352	29.008333	387.56354	29.120833	387.72393	29.233333	387.88471
28.9	387.40944	29.0125	387.56947	29.125	387.72988	29.2375	387.89067
28.904167	387.41536	29.016667	387.57541	29.129167	387.73583	29.241667	387.89663

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
29.245833	387.90259	29.358333	388.06379	29.470833	388.22536	29.583333	388.3873
29.25	387.90856	29.3625	388.06976	29.475	388.23135	29.5875	388.3933
29.254167	387.91452	29.366667	388.07574	29.479167	388.23734	29.591667	388.39931
29.258333	387.92048	29.370833	388.08172	29.483333	388.24333	29.595833	388.40531
29.2625	387.92645	29.375	388.0877	29.4875	388.24932	29.6	388.41132
29.266667	387.93242	29.379167	388.09368	29.491667	388.25532	29.604167	388.41733
29.270833	387.93838	29.383333	388.09966	29.495833	388.26131	29.608333	388.42334
29.275	387.94435	29.3875	388.10564	29.5	388.2673	29.6125	388.42934
29.279167	387.95031	29.391667	388.11162	29.504167	388.2733	29.616667	388.43535
29.283333	387.95628	29.395833	388.1176	29.508333	388.27929	29.620833	388.44136
29.2875	387.96225	29.4	388.12358	29.5125	388.28529	29.625	388.44737
29.291667	387.96822	29.404167	388.12957	29.516667	388.29129	29.629167	388.45338
29.295833	387.97419	29.408333	388.13555	29.520833	388.29728	29.633333	388.45939
29.3	387.98016	29.4125	388.14153	29.525	388.30328	29.6375	388.4654
29.304167	387.98613	29.416667	388.14752	29.529167	388.30928	29.641667	388.47141
29.308333	387.9921	29.420833	388.1535	29.533333	388.31528	29.645833	388.47743
29.3125	387.99807	29.425	388.15949	29.5375	388.32128	29.65	388.48344
29.316667	388.00404	29.429167	388.16547	29.541667	388.32728	29.654167	388.48945
29.320833	388.01001	29.433333	388.17146	29.545833	388.33328	29.658333	388.49547
29.325	388.01599	29.4375	388.17744	29.55	388.33928	29.6625	388.50148
29.329167	388.02196	29.441667	388.18343	29.554167	388.34528	29.666667	388.50749
29.333333	388.02793	29.445833	388.18942	29.558333	388.35128	29.670833	388.51351
29.3375	388.03391	29.45	388.19541	29.5625	388.35728	29.675	388.51953
29.341667	388.03988	29.454167	388.2014	29.566667	388.36328	29.679167	388.52554
29.345833	388.04586	29.458333	388.20738	29.570833	388.36929	29.683333	388.53156
29.35	388.05183	29.4625	388.21337	29.575	388.37529	29.6875	388.53758
29.354167	388.05781	29.466667	388.21936	29.579167	388.38129	29.691667	388.54359

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
29.695833	388.54961	29.808333	388.71229	29.920833	388.87534	30.033333	389.03876
29.7	388.55563	29.8125	388.71833	29.925	388.88139	30.0375	389.04482
29.704167	388.56165	29.816667	388.72436	29.929167	388.88744	30.041667	389.05088
29.708333	388.56767	29.820833	388.73039	29.933333	388.89348	30.045833	389.05694
29.7125	388.57369	29.825	388.73643	29.9375	388.89953	30.05	389.063
29.716667	388.57971	29.829167	388.74246	29.941667	388.90558	30.054167	389.06906
29.720833	388.58573	29.833333	388.7485	29.945833	388.91163	30.058333	389.07512
29.725	388.59175	29.8375	388.75453	29.95	388.91768	30.0625	389.08118
29.729167	388.59778	29.841667	388.76057	29.954167	388.92372	30.066667	389.08725
29.733333	388.6038	29.845833	388.7666	29.958333	388.92977	30.070833	389.09331
29.7375	388.60982	29.85	388.77264	29.9625	388.93582	30.075	389.09937
29.741667	388.61585	29.854167	388.77868	29.966667	388.94188	30.079167	389.10544
29.745833	388.62187	29.858333	388.78472	29.970833	388.94793	30.083333	389.1115
29.75	388.62789	29.8625	388.79075	29.975	388.95398	30.0875	389.11757
29.754167	388.63392	29.866667	388.79679	29.979167	388.96003	30.091667	389.12363
29.758333	388.63995	29.870833	388.80283	29.983333	388.96608	30.095833	389.1297
29.7625	388.64597	29.875	388.80887	29.9875	388.97214	30.1	389.13577
29.766667	388.652	29.879167	388.81491	29.991667	388.97819	30.104167	389.14183
29.770833	388.65803	29.883333	388.82095	29.995833	388.98425	30.108333	389.1479
29.775	388.66405	29.8875	388.82699	30	388.9903	30.1125	389.15397
29.779167	388.67008	29.891667	388.83304	30.004167	388.99636	30.116667	389.16004
29.783333	388.67611	29.895833	388.83908	30.008333	389.00241	30.120833	389.16611
29.7875	388.68214	29.9	388.84512	30.0125	389.00847	30.125	389.17218
29.791667	388.68817	29.904167	388.85117	30.016667	389.01452	30.129167	389.17825
29.795833	388.6942	29.908333	388.85721	30.020833	389.02058	30.133333	389.18432
29.8	388.70023	29.9125	388.86325	30.025	389.02664	30.1375	389.19039
29.804167	388.70626	29.916667	388.8693	30.029167	389.0327	30.141667	389.19646

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
30.145833	389.20253	30.258333	389.36667	30.370833	389.53116	30.483333	389.696
30.15	389.2086	30.2625	389.37275	30.375	389.53726	30.4875	389.70212
30.154167	389.21468	30.266667	389.37884	30.379167	389.54336	30.491667	389.70823
30.158333	389.22075	30.270833	389.38492	30.383333	389.54946	30.495833	389.71434
30.1625	389.22683	30.275	389.39101	30.3875	389.55556	30.5	389.72046
30.166667	389.2329	30.279167	389.3971	30.391667	389.56166	30.504167	389.72657
30.170833	389.23897	30.283333	389.40319	30.395833	389.56776	30.508333	389.73268
30.175	389.24505	30.2875	389.40928	30.4	389.57386	30.5125	389.7388
30.179167	389.25113	30.291667	389.41537	30.404167	389.57996	30.516667	389.74491
30.183333	389.2572	30.295833	389.42146	30.408333	389.58607	30.520833	389.75103
30.1875	389.26328	30.3	389.42755	30.4125	389.59217	30.525	389.75715
30.191667	389.26936	30.304167	389.43364	30.416667	389.59827	30.529167	389.76326
30.195833	389.27544	30.308333	389.43973	30.420833	389.60438	30.533333	389.76938
30.2	389.28151	30.3125	389.44582	30.425	389.61048	30.5375	389.7755
30.204167	389.28759	30.316667	389.45191	30.429167	389.61659	30.541667	389.78162
30.208333	389.29367	30.320833	389.45801	30.433333	389.62269	30.545833	389.78774
30.2125	389.29975	30.325	389.4641	30.4375	389.6288	30.55	389.79386
30.216667	389.30583	30.329167	389.47019	30.441667	389.63491	30.554167	389.79998
30.220833	389.31191	30.333333	389.47629	30.445833	389.64102	30.558333	389.8061
30.225	389.318	30.3375	389.48238	30.45	389.64712	30.5625	389.81222
30.229167	389.32408	30.341667	389.48848	30.454167	389.65323	30.566667	389.81834
30.233333	389.33016	30.345833	389.49457	30.458333	389.65934	30.570833	389.82446
30.2375	389.33624	30.35	389.50067	30.4625	389.66545	30.575	389.83058
30.241667	389.34233	30.354167	389.50677	30.466667	389.67156	30.579167	389.83671
30.245833	389.34841	30.358333	389.51286	30.470833	389.67767	30.583333	389.84283
30.25	389.3545	30.3625	389.51896	30.475	389.68378	30.5875	389.84895
30.254167	389.36058	30.366667	389.52506	30.479167	389.68989	30.591667	389.85508

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
30.595833	389.8612	30.708333	390.02675	30.820833	390.19265	30.933333	390.3589
30.6	389.86733	30.7125	390.03289	30.825	390.1988	30.9375	390.36506
30.604167	389.87345	30.716667	390.03903	30.829167	390.20495	30.941667	390.37122
30.608333	389.87958	30.720833	390.04517	30.833333	390.21111	30.945833	390.37739
30.6125	389.88571	30.725	390.05131	30.8375	390.21726	30.95	390.38355
30.616667	389.89183	30.729167	390.05745	30.841667	390.22341	30.954167	390.38972
30.620833	389.89796	30.733333	390.06359	30.845833	390.22956	30.958333	390.39589
30.625	389.90409	30.7375	390.06973	30.85	390.23572	30.9625	390.40205
30.629167	389.91022	30.741667	390.07587	30.854167	390.24187	30.966667	390.40822
30.633333	389.91635	30.745833	390.08201	30.858333	390.24803	30.970833	390.41439
30.6375	389.92248	30.75	390.08816	30.8625	390.25418	30.975	390.42056
30.641667	389.92861	30.754167	390.0943	30.866667	390.26034	30.979167	390.42672
30.645833	389.93474	30.758333	390.10044	30.870833	390.26649	30.983333	390.43289
30.65	389.94087	30.7625	390.10659	30.875	390.27265	30.9875	390.43906
30.654167	389.947	30.766667	390.11273	30.879167	390.27881	30.991667	390.44523
30.658333	389.95313	30.770833	390.11888	30.883333	390.28497	30.995833	390.4514
30.6625	389.95926	30.775	390.12502	30.8875	390.29112	31	390.45757
30.666667	389.9654	30.779167	390.13117	30.891667	390.29728	31.004167	390.46375
30.670833	389.97153	30.783333	390.13731	30.895833	390.30344	31.008333	390.46992
30.675	389.97766	30.7875	390.14346	30.9	390.3096	31.0125	390.47609
30.679167	389.9838	30.791667	390.14961	30.904167	390.31576	31.016667	390.48226
30.683333	389.98993	30.795833	390.15575	30.908333	390.32192	31.020833	390.48844
30.6875	389.99607	30.8	390.1619	30.9125	390.32808	31.025	390.49461
30.691667	390.0022	30.804167	390.16805	30.916667	390.33424	31.029167	390.50078
30.695833	390.00834	30.808333	390.1742	30.920833	390.34041	31.033333	390.50696
30.7	390.01448	30.8125	390.18035	30.925	390.34657	31.0375	390.51313
30.704167	390.02061	30.816667	390.1865	30.929167	390.35273	31.041667	390.51931

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
31.045833	390.52548	31.158333	390.69242	31.270833	390.85969	31.383333	391.0273
31.05	390.53166	31.1625	390.69861	31.275	390.86589	31.3875	391.03351
31.054167	390.53784	31.166667	390.70479	31.279167	390.87209	31.391667	391.03973
31.058333	390.54402	31.170833	390.71098	31.283333	390.87829	31.395833	391.04594
31.0625	390.55019	31.175	390.71718	31.2875	390.8845	31.4	391.05216
31.066667	390.55637	31.179167	390.72337	31.291667	390.8907	31.404167	391.05837
31.070833	390.56255	31.183333	390.72956	31.295833	390.8969	31.408333	391.06459
31.075	390.56873	31.1875	390.73575	31.3	390.90311	31.4125	391.07081
31.079167	390.57491	31.191667	390.74194	31.304167	390.90931	31.416667	391.07702
31.083333	390.58109	31.195833	390.74814	31.308333	390.91552	31.420833	391.08324
31.0875	390.58727	31.2	390.75433	31.3125	390.92173	31.425	391.08946
31.091667	390.59345	31.204167	390.76052	31.316667	390.92793	31.429167	391.09568
31.095833	390.59963	31.208333	390.76672	31.320833	390.93414	31.433333	391.1019
31.1	390.60582	31.2125	390.77291	31.325	390.94035	31.4375	391.10812
31.104167	390.612	31.216667	390.77911	31.329167	390.94655	31.441667	391.11434
31.108333	390.61818	31.220833	390.7853	31.333333	390.95276	31.445833	391.12056
31.1125	390.62437	31.225	390.7915	31.3375	390.95897	31.45	391.12678
31.116667	390.63055	31.229167	390.7977	31.341667	390.96518	31.454167	391.133
31.120833	390.63673	31.233333	390.80389	31.345833	390.97139	31.458333	391.13922
31.125	390.64292	31.2375	390.81009	31.35	390.9776	31.4625	391.14545
31.129167	390.6491	31.241667	390.81629	31.354167	390.98381	31.466667	391.15167
31.133333	390.65529	31.245833	390.82249	31.358333	390.99002	31.470833	391.15789
31.1375	390.66148	31.25	390.82869	31.3625	390.99623	31.475	391.16412
31.141667	390.66766	31.254167	390.83488	31.366667	391.00244	31.479167	391.17034
31.145833	390.67385	31.258333	390.84108	31.370833	391.00866	31.483333	391.17656
31.15	390.68004	31.2625	390.84729	31.375	391.01487	31.4875	391.18279
31.154167	390.68623	31.266667	390.85349	31.379167	391.02108	31.491667	391.18902

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
31.495833	391.19524	31.608333	391.36352	31.720833	391.53213	31.833333	391.70107
31.5	391.20147	31.6125	391.36976	31.725	391.53838	31.8375	391.70733
31.504167	391.2077	31.616667	391.376	31.729167	391.54463	31.841667	391.7136
31.508333	391.21392	31.620833	391.38224	31.733333	391.55089	31.845833	391.71986
31.5125	391.22015	31.625	391.38848	31.7375	391.55714	31.85	391.72613
31.516667	391.22638	31.629167	391.39472	31.741667	391.56339	31.854167	391.73239
31.520833	391.23261	31.633333	391.40096	31.745833	391.56964	31.858333	391.73866
31.525	391.23884	31.6375	391.4072	31.75	391.5759	31.8625	391.74492
31.529167	391.24507	31.641667	391.41344	31.754167	391.58215	31.866667	391.75119
31.533333	391.2513	31.645833	391.41969	31.758333	391.58841	31.870833	391.75746
31.5375	391.25753	31.65	391.42593	31.7625	391.59466	31.875	391.76372
31.541667	391.26376	31.654167	391.43217	31.766667	391.60092	31.879167	391.76999
31.545833	391.26999	31.658333	391.43842	31.770833	391.60717	31.883333	391.77626
31.55	391.27622	31.6625	391.44466	31.775	391.61343	31.8875	391.78253
31.554167	391.28246	31.666667	391.45091	31.779167	391.61969	31.891667	391.7888
31.558333	391.28869	31.670833	391.45715	31.783333	391.62595	31.895833	391.79507
31.5625	391.29492	31.675	391.4634	31.7875	391.6322	31.9	391.80134
31.566667	391.30116	31.679167	391.46964	31.791667	391.63846	31.904167	391.80761
31.570833	391.30739	31.683333	391.47589	31.795833	391.64472	31.908333	391.81388
31.575	391.31363	31.6875	391.48214	31.8	391.65098	31.9125	391.82015
31.579167	391.31986	31.691667	391.48839	31.804167	391.65724	31.916667	391.82642
31.583333	391.3261	31.695833	391.49463	31.808333	391.6635	31.920833	391.83269
31.5875	391.33233	31.7	391.50088	31.8125	391.66976	31.925	391.83897
31.591667	391.33857	31.704167	391.50713	31.816667	391.67602	31.929167	391.84524
31.595833	391.34481	31.708333	391.51338	31.820833	391.68228	31.933333	391.85151
31.6	391.35104	31.7125	391.51963	31.825	391.68855	31.9375	391.85779
31.604167	391.35728	31.716667	391.52588	31.829167	391.69481	31.941667	391.86406

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
31.945833	391.87034	32.058333	392.03993	32.170833	392.20985	32.283333	392.38008
31.95	391.87661	32.0625	392.04622	32.175	392.21615	32.2875	392.3864
31.954167	391.88289	32.066667	392.05251	32.179167	392.22245	32.291667	392.39271
31.958333	391.88917	32.070833	392.05879	32.183333	392.22875	32.295833	392.39902
31.9625	391.89544	32.075	392.06508	32.1875	392.23505	32.3	392.40533
31.966667	391.90172	32.079167	392.07137	32.191667	392.24135	32.304167	392.41164
31.970833	391.908	32.083333	392.07766	32.195833	392.24765	32.308333	392.41796
31.975	391.91428	32.0875	392.08395	32.2	392.25395	32.3125	392.42427
31.979167	391.92055	32.091667	392.09024	32.204167	392.26025	32.316667	392.43059
31.983333	391.92683	32.095833	392.09653	32.208333	392.26656	32.320833	392.4369
31.9875	391.93311	32.1	392.10283	32.2125	392.27286	32.325	392.44322
31.991667	391.93939	32.104167	392.10912	32.216667	392.27916	32.329167	392.44953
31.995833	391.94567	32.108333	392.11541	32.220833	392.28547	32.333333	392.45585
32	391.95195	32.1125	392.1217	32.225	392.29177	32.3375	392.46216
32.004167	391.95823	32.116667	392.128	32.229167	392.29808	32.341667	392.46848
32.008333	391.96452	32.120833	392.13429	32.233333	392.30438	32.345833	392.4748
32.0125	391.9708	32.125	392.14058	32.2375	392.31069	32.35	392.48112
32.016667	391.97708	32.129167	392.14688	32.241667	392.317	32.354167	392.48743
32.020833	391.98336	32.133333	392.15317	32.245833	392.3233	32.358333	392.49375
32.025	391.98965	32.1375	392.15947	32.25	392.32961	32.3625	392.50007
32.029167	391.99593	32.141667	392.16576	32.254167	392.33592	32.366667	392.50639
32.033333	392.00222	32.145833	392.17206	32.258333	392.34223	32.370833	392.51271
32.0375	392.0085	32.15	392.17836	32.2625	392.34853	32.375	392.51903
32.041667	392.01479	32.154167	392.18465	32.266667	392.35484	32.379167	392.52535
32.045833	392.02107	32.158333	392.19095	32.270833	392.36115	32.383333	392.53167
32.05	392.02736	32.1625	392.19725	32.275	392.36746	32.3875	392.538
32.054167	392.03364	32.166667	392.20355	32.279167	392.37377	32.391667	392.54432

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
32.395833	392.55064	32.508333	392.72151	32.620833	392.8927	32.733333	393.0642
32.4	392.55696	32.5125	392.72785	32.625	392.89905	32.7375	393.07056
32.404167	392.56329	32.516667	392.73418	32.629167	392.9054	32.741667	393.07692
32.408333	392.56961	32.520833	392.74052	32.633333	392.91174	32.745833	393.08328
32.4125	392.57594	32.525	392.74686	32.6375	392.91809	32.75	393.08964
32.416667	392.58226	32.529167	392.75319	32.641667	392.92444	32.754167	393.096
32.420833	392.58859	32.533333	392.75953	32.645833	392.93079	32.758333	393.10236
32.425	392.59491	32.5375	392.76587	32.65	392.93714	32.7625	393.10872
32.429167	392.60124	32.541667	392.7722	32.654167	392.94349	32.766667	393.11508
32.433333	392.60756	32.545833	392.77854	32.658333	392.94984	32.770833	393.12144
32.4375	392.61389	32.55	392.78488	32.6625	392.95619	32.775	393.1278
32.441667	392.62022	32.554167	392.79122	32.666667	392.96254	32.779167	393.13417
32.445833	392.62655	32.558333	392.79756	32.670833	392.96889	32.783333	393.14053
32.45	392.63287	32.5625	392.8039	32.675	392.97524	32.7875	393.14689
32.454167	392.6392	32.566667	392.81024	32.679167	392.98159	32.791667	393.15325
32.458333	392.64553	32.570833	392.81658	32.683333	392.98794	32.795833	393.15962
32.4625	392.65186	32.575	392.82292	32.6875	392.9943	32.8	393.16598
32.466667	392.65819	32.579167	392.82926	32.691667	393.00065	32.804167	393.17235
32.470833	392.66452	32.583333	392.83561	32.695833	393.007	32.808333	393.17871
32.475	392.67085	32.5875	392.84195	32.7	393.01336	32.8125	393.18508
32.479167	392.67718	32.591667	392.84829	32.704167	393.01971	32.816667	393.19144
32.483333	392.68352	32.595833	392.85463	32.708333	393.02607	32.820833	393.19781
32.4875	392.68985	32.6	392.86098	32.7125	393.03242	32.825	393.20418
32.491667	392.69618	32.604167	392.86732	32.716667	393.03878	32.829167	393.21054
32.495833	392.70251	32.608333	392.87367	32.720833	393.04513	32.833333	393.21691
32.5	392.70885	32.6125	392.88001	32.725	393.05149	32.8375	393.22328
32.504167	392.71518	32.616667	392.88636	32.729167	393.05785	32.841667	393.22965

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
34.195833	395.32133	34.308333	395.49701	34.425	395.67949	34.5375	395.85575
34.2	395.32783	34.3125	395.50352	34.429167	395.68602	34.541667	395.86228
34.204167	395.33433	34.316667	395.51003	34.433333	395.69254	34.545833	395.86882
34.208333	395.34084	34.320833	395.51655	34.4375	395.69906	34.55	395.87535
34.2125	395.34734	34.325	395.52306	34.441667	395.70559	34.554167	395.88188
34.216667	395.35384	34.329167	395.52957	34.445833	395.71211	34.558333	395.88842
34.220833	395.36035	34.333333	395.53609	34.45	395.71864	34.5625	395.89495
34.225	395.36685	34.3375	395.5426	34.454167	395.72516	34.566667	395.90149
34.229167	395.37335	34.341667	395.54912	34.458333	395.73169	34.570833	395.90803
34.233333	395.37986	34.345833	395.55563	34.4625	395.73821	34.575	395.91456
34.2375	395.38636	34.35	395.56215	34.466667	395.74474	34.579167	395.9211
34.241667	395.39287	34.354167	395.56866	34.470833	395.75127	34.583333	395.92764
34.245833	395.39937	34.358333	395.57518	34.475	395.75779	34.5875	395.93417
34.25	395.40588	34.3625	395.5817	34.479167	395.76432	34.591667	395.94071
34.254167	395.41239	34.366667	395.58821	34.483333	395.77085	34.595833	395.94725
34.258333	395.41889	34.370833	395.59473	34.4875	395.77738	34.6	395.95379
34.2625	395.4254	34.375	395.60125	34.491667	395.78391	34.604167	395.96033
34.266667	395.43191	34.379167	395.60777	34.495833	395.79044	34.608333	395.96687
34.270833	395.43842	34.383333	395.61429	34.5	395.79697	34.6125	395.97341
34.275	395.44493	34.3875	395.6208	34.504167	395.8035	34.616667	395.97995
34.279167	395.45144	34.391667	395.62732	34.508333	395.81003	34.620833	395.98649
34.283333	395.45794	34.395833	395.63384	34.5125	395.81656	34.625	395.99303
34.2875	395.46445	34.4	395.64036	34.516667	395.82309	34.629167	395.99957
34.291667	395.47096	34.404167	395.64689	34.520833	395.82962	34.633333	396.00611
34.295833	395.47748	34.408333	395.65341	34.525	395.83615	34.6375	396.01265
34.3	395.48399	34.4125	395.65993	34.529167	395.84268	34.641667	396.0192
34.304167	395.4905	34.416667	395.66645	34.533333	395.84922	34.645833	396.02574

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
35.1	396.74118	35.2125	396.91908	35.325	397.09725	35.4375	397.27569
35.104167	396.74776	35.216667	396.92567	35.329167	397.10386	35.441667	397.2823
35.108333	396.75435	35.220833	396.93227	35.333333	397.11046	35.445833	397.28892
35.1125	396.76093	35.225	396.93886	35.3375	397.11706	35.45	397.29553
35.116667	396.76752	35.229167	396.94546	35.341667	397.12367	35.454167	397.30215
35.120833	396.7741	35.233333	396.95205	35.345833	397.13028	35.458333	397.30876
35.125	396.78069	35.2375	396.95865	35.35	397.13688	35.4625	397.31538
35.129167	396.78727	35.241667	396.96525	35.354167	397.14349	35.466667	397.32199
35.133333	396.79386	35.245833	396.97184	35.358333	397.15009	35.470833	397.32861
35.1375	396.80045	35.25	396.97844	35.3625	397.1567	35.475	397.33523
35.141667	396.80704	35.254167	396.98504	35.366667	397.16331	35.479167	397.34184
35.145833	396.81362	35.258333	396.99164	35.370833	397.16992	35.483333	397.34846
35.15	396.82021	35.2625	396.99823	35.375	397.17652	35.4875	397.35508
35.154167	396.8268	35.266667	397.00483	35.379167	397.18313	35.491667	397.3617
35.158333	396.83339	35.270833	397.01143	35.383333	397.18974	35.495833	397.36832
35.1625	396.83998	35.275	397.01803	35.3875	397.19635	35.5	397.37494
35.166667	396.84657	35.279167	397.02463	35.391667	397.20296	35.504167	397.38155
35.170833	396.85316	35.283333	397.03123	35.395833	397.20957	35.508333	397.38817
35.175	396.85975	35.2875	397.03783	35.4	397.21618	35.5125	397.39479
35.179167	396.86634	35.291667	397.04443	35.404167	397.22279	35.516667	397.40141
35.183333	396.87293	35.295833	397.05103	35.408333	397.2294	35.520833	397.40804
35.1875	396.87952	35.3	397.05763	35.4125	397.23601	35.525	397.41466
35.191667	396.88611	35.304167	397.06424	35.416667	397.24262	35.529167	397.42128
35.195833	396.89271	35.308333	397.07084	35.420833	397.24924	35.533333	397.4279
35.2	396.8993	35.3125	397.07744	35.425	397.25585	35.5375	397.43452
35.204167	396.90589	35.316667	397.08404	35.429167	397.26246	35.541667	397.44114
35.208333	396.91249	35.320833	397.09065	35.433333	397.26908	35.545833	397.44777

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
35.55	397.45439	35.6625	397.63336	35.775	397.81258	35.8375	397.91226
35.554167	397.46101	35.666667	397.63999	35.779167	397.81922	35.841667	397.91891
35.558333	397.46764	35.670833	397.64662	35.783333	397.82587	35.845833	397.92556
35.5625	397.47426	35.675	397.65326	35.7875	397.83251	35.85	397.93221
35.566667	397.48089	35.679167	397.65989	35.791667	397.83915	35.854167	397.93886
35.570833	397.48751	35.683333	397.66653	35.795833	397.8458	35.858333	397.94551
35.575	397.49414	35.6875	397.67316	35.8	397.85244	35.8625	397.95216
35.579167	397.50076	35.691667	397.6798	35.804167	397.85909	35.866667	397.95881
35.583333	397.50739	35.695833	397.68643	35.808333	397.86573	35.870833	397.96546
35.5875	397.51402	35.7	397.69307	35.8125	397.87238	35.875	397.97211
35.591667	397.52064	35.704167	397.6997	35.816667	397.87903	35.879167	397.97876
35.595833	397.52727	35.708333	397.70634	35.820833	397.88567	35.883333	397.98541
35.6	397.5339	35.7125	397.71298	35.825	397.89232	35.8875	397.99206
35.604167	397.54053	35.716667	397.71962	35.829167	397.89897	35.891667	397.99872
35.608333	397.54715	35.720833	397.72625	35.833333	397.90561	35.895833	398.00537
35.6125	397.55378	35.725	397.73289	35.8375	397.91226	35.9	398.01202
35.616667	397.56041	35.729167	397.73953	35.841667	397.91891	35.904167	398.01868
35.620833	397.56704	35.733333	397.74617	35.845833	397.92556	35.908333	398.02533
35.625	397.57367	35.7375	397.75281	35.85	397.93221	35.9125	398.03198
35.629167	397.5803	35.741667	397.75945	35.854167	397.93886	35.916667	398.03864
35.633333	397.58693	35.745833	397.76609	35.858333	397.94551	35.920833	398.04529
35.6375	397.59356	35.75	397.77273	35.8625	397.95216	35.925	398.05195
35.641667	397.60019	35.754167	397.77937	35.866667	397.95881	35.929167	398.0586
35.645833	397.60683	35.758333	397.78601	35.870833	397.96546	35.933333	398.06526
35.65	397.61346	35.7625	397.79265	35.875	397.97211	35.9375	398.07192
35.654167	397.62009	35.766667	397.7993	35.879167	397.97876	35.941667	398.07857
35.658333	397.62672	35.770833	397.80594	35.883333	397.98541	35.945833	398.08523

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
35.95	398.09189	36.0625	398.27177	36.175	398.45191	36.2875	398.6323
35.954167	398.09855	36.066667	398.27844	36.179167	398.45858	36.291667	398.63898
35.958333	398.1052	36.070833	398.28511	36.183333	398.46526	36.295833	398.64567
35.9625	398.11186	36.075	398.29177	36.1875	398.47194	36.3	398.65236
35.966667	398.11852	36.079167	398.29844	36.191667	398.47862	36.304167	398.65904
35.970833	398.12518	36.083333	398.30511	36.195833	398.48529	36.308333	398.66573
35.975	398.13184	36.0875	398.31178	36.2	398.49197	36.3125	398.67242
35.979167	398.1385	36.091667	398.31845	36.204167	398.49865	36.316667	398.67911
35.983333	398.14516	36.095833	398.32512	36.208333	398.50533	36.320833	398.68579
35.9875	398.15182	36.1	398.33179	36.2125	398.51201	36.325	398.69248
35.991667	398.15848	36.104167	398.33846	36.216667	398.51869	36.329167	398.69917
35.995833	398.16514	36.108333	398.34513	36.220833	398.52537	36.333333	398.70586
36	398.1718	36.1125	398.3518	36.225	398.53205	36.3375	398.71255
36.004167	398.17847	36.116667	398.35847	36.229167	398.53873	36.341667	398.71924
36.008333	398.18513	36.120833	398.36514	36.233333	398.54541	36.345833	398.72593
36.0125	398.19179	36.125	398.37182	36.2375	398.55209	36.35	398.73262
36.016667	398.19845	36.129167	398.37849	36.241667	398.55877	36.354167	398.73931
36.020833	398.20512	36.133333	398.38516	36.245833	398.56546	36.358333	398.746
36.025	398.21178	36.1375	398.39183	36.25	398.57214	36.3625	398.7527
36.029167	398.21845	36.141667	398.39851	36.254167	398.57882	36.366667	398.75939
36.033333	398.22511	36.145833	398.40518	36.258333	398.58551	36.370833	398.76608
36.0375	398.23177	36.15	398.41186	36.2625	398.59219	36.375	398.77277
36.041667	398.23844	36.154167	398.41853	36.266667	398.59887	36.379167	398.77947
36.045833	398.24511	36.158333	398.4252	36.270833	398.60556	36.383333	398.78616
36.05	398.25177	36.1625	398.43188	36.275	398.61224	36.3875	398.79285
36.054167	398.25844	36.166667	398.43856	36.279167	398.61893	36.391667	398.79955
36.058333	398.2651	36.170833	398.44523	36.283333	398.62561	36.395833	398.80624

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
36.4	398.81294	36.5125	398.99383	36.625	399.17496	36.7375	399.35635
36.404167	398.81963	36.516667	399.00053	36.629167	399.18168	36.741667	399.36307
36.408333	398.82633	36.520833	399.00724	36.633333	399.18839	36.745833	399.36979
36.4125	398.83302	36.525	399.01394	36.6375	399.19511	36.75	399.37652
36.416667	398.83972	36.529167	399.02065	36.641667	399.20182	36.754167	399.38324
36.420833	398.84642	36.533333	399.02735	36.645833	399.20854	36.758333	399.38996
36.425	398.85311	36.5375	399.03406	36.65	399.21525	36.7625	399.39669
36.429167	398.85981	36.541667	399.04077	36.654167	399.22197	36.766667	399.40341
36.433333	398.86651	36.545833	399.04747	36.658333	399.22868	36.770833	399.41014
36.4375	398.87321	36.55	399.05418	36.6625	399.2354	36.775	399.41686
36.441667	398.87991	36.554167	399.06089	36.666667	399.24211	36.779167	399.42359
36.445833	398.8866	36.558333	399.06759	36.670833	399.24883	36.783333	399.43031
36.45	398.8933	36.5625	399.0743	36.675	399.25555	36.7875	399.43704
36.454167	398.9	36.566667	399.08101	36.679167	399.26227	36.791667	399.44377
36.458333	398.9067	36.570833	399.08772	36.683333	399.26898	36.795833	399.45049
36.4625	398.9134	36.575	399.09443	36.6875	399.2757	36.8	399.45722
36.466667	398.9201	36.579167	399.10114	36.691667	399.28242	36.804167	399.46395
36.470833	398.9268	36.583333	399.10785	36.695833	399.28914	36.808333	399.47068
36.475	398.9335	36.5875	399.11456	36.7	399.29586	36.8125	399.4774
36.479167	398.9402	36.591667	399.12127	36.704167	399.30258	36.816667	399.48413
36.483333	398.94691	36.595833	399.12798	36.708333	399.3093	36.820833	399.49086
36.4875	398.95361	36.6	399.13469	36.7125	399.31602	36.825	399.49759
36.491667	398.96031	36.604167	399.1414	36.716667	399.32274	36.829167	399.50432
36.495833	398.96701	36.608333	399.14811	36.720833	399.32946	36.833333	399.51105
36.5	398.97372	36.6125	399.15483	36.725	399.33618	36.8375	399.51778
36.504167	398.98042	36.616667	399.16154	36.729167	399.3429	36.841667	399.52451
36.508333	398.98712	36.620833	399.16825	36.733333	399.34962	36.845833	399.53124

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
36.85	399.53797	36.9625	399.71984	37.075	399.90195	37.1875	400.08429
36.854167	399.5447	36.966667	399.72658	37.079167	399.9087	37.191667	400.09105
36.858333	399.55144	36.970833	399.73332	37.083333	399.91545	37.195833	400.09781
36.8625	399.55817	36.975	399.74006	37.0875	399.9222	37.2	400.10457
36.866667	399.5649	36.979167	399.7468	37.091667	399.92895	37.204167	400.11133
36.870833	399.57163	36.983333	399.75355	37.095833	399.9357	37.208333	400.11809
36.875	399.57837	36.9875	399.76029	37.1	399.94245	37.2125	400.12485
36.879167	399.5851	36.991667	399.76703	37.104167	399.9492	37.216667	400.13161
36.883333	399.59183	36.995833	399.77377	37.108333	399.95595	37.220833	400.13837
36.8875	399.59857	37	399.78052	37.1125	399.9627	37.225	400.14513
36.891667	399.6053	37.004167	399.78726	37.116667	399.96946	37.229167	400.15189
36.895833	399.61204	37.008333	399.794	37.120833	399.97621	37.233333	400.15865
36.9	399.61877	37.0125	399.80075	37.125	399.98296	37.2375	400.16541
36.904167	399.62551	37.016667	399.80749	37.129167	399.98971	37.241667	400.17217
36.908333	399.63224	37.020833	399.81424	37.133333	399.99647	37.245833	400.17894
36.9125	399.63898	37.025	399.82098	37.1375	400.00322	37.25	400.1857
36.916667	399.64572	37.029167	399.82773	37.141667	400.00998	37.254167	400.19246
36.920833	399.65245	37.033333	399.83447	37.145833	400.01673	37.258333	400.19923
36.925	399.65919	37.0375	399.84122	37.15	400.02349	37.2625	400.20599
36.929167	399.66593	37.041667	399.84797	37.154167	400.03024	37.266667	400.21275
36.933333	399.67267	37.045833	399.85471	37.158333	400.037	37.270833	400.21952
36.9375	399.6794	37.05	399.86146	37.1625	400.04375	37.275	400.22628
36.941667	399.68614	37.054167	399.86821	37.166667	400.05051	37.279167	400.23305
36.945833	399.69288	37.058333	399.87495	37.170833	400.05726	37.283333	400.23981
36.95	399.69962	37.0625	399.8817	37.175	400.06402	37.2875	400.24658
36.954167	399.70636	37.066667	399.88845	37.179167	400.07078	37.291667	400.25334
36.958333	399.7131	37.070833	399.8952	37.183333	400.07754	37.295833	400.26011

ตารางผนวกข.5 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
37.3	400.26688	37.4125	400.44969	37.525	400.63274	37.6375	400.81602
37.304167	400.27364	37.416667	400.45647	37.529167	400.63952	37.641667	400.82281
37.308333	400.28041	37.420833	400.46324	37.533333	400.64631	37.645833	400.82961
37.3125	400.28718	37.425	400.47002	37.5375	400.65309	37.65	400.8364
37.316667	400.29394	37.429167	400.4768	37.541667	400.65988	37.654167	400.84319
37.320833	400.30071	37.433333	400.48357	37.545833	400.66666	37.658333	400.84999
37.325	400.30748	37.4375	400.49035	37.55	400.67345	37.6625	400.85678
37.329167	400.31425	37.441667	400.49713	37.554167	400.68024	37.666667	400.86358
37.333333	400.32102	37.445833	400.5039	37.558333	400.68702	37.670833	400.87037
37.3375	400.32779	37.45	400.51068	37.5625	400.69381	37.675	400.87717
37.341667	400.33456	37.454167	400.51746	37.566667	400.7006	37.679167	400.88396
37.345833	400.34133	37.458333	400.52424	37.570833	400.70738	37.683333	400.89076
37.35	400.3481	37.4625	400.53102	37.575	400.71417	37.6875	400.89755
37.354167	400.35487	37.466667	400.5378	37.579167	400.72096	37.691667	400.90435
37.358333	400.36164	37.470833	400.54458	37.583333	400.72775	37.695833	400.91115
37.3625	400.36841	37.475	400.55136	37.5875	400.73453	37.7	400.91794
37.366667	400.37518	37.479167	400.55814	37.591667	400.74132	37.704167	400.92474
37.370833	400.38195	37.483333	400.56492	37.595833	400.74811	37.708333	400.93154
37.375	400.38873	37.4875	400.5717	37.6	400.7549	37.7125	400.93834
37.379167	400.3955	37.491667	400.57848	37.604167	400.76169	37.716667	400.94513
37.383333	400.40227	37.495833	400.58526	37.608333	400.76848	37.720833	400.95193
37.3875	400.40905	37.5	400.59204	37.6125	400.77527	37.725	400.95873
37.391667	400.41582	37.504167	400.59883	37.616667	400.78206	37.729167	400.96553
37.395833	400.42259	37.508333	400.60561	37.620833	400.78885	37.733333	400.97233
37.4	400.42937	37.5125	400.61239	37.625	400.79565	37.7375	400.97913
37.404167	400.43614	37.516667	400.61917	37.629167	400.80244	37.741667	400.98593
37.408333	400.44292	37.520833	400.62596	37.633333	400.80923	37.745833	400.99273

ตารางผนวกข.8 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 648.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.15	23	384.0994	46	427.113	69	473.2395
1	313.6091	24	385.7216	47	429.1368	70	475.1698
2	318.0236	25	387.3766	48	431.1639	71	477.0897
3	322.3924	26	389.0626	49	433.1933	72	478.9988
4	326.7151	27	390.7781	50	435.2242	73	480.8967
5	330.9923	28	392.5214	51	437.2559	74	482.7834
6	335.2299	29	394.2908	52	439.2875	75	484.6601
7	339.4262	30	396.0848	53	441.3184	76	486.5248
8	343.5766	31	397.902	54	443.348	77	488.3772
9	347.6811	32	399.7408	55	445.3779	77.96667	490.156
10	351.7396	33	401.6007	56	447.4054		
11	355.7529	34	403.4825	57	449.4294		
12	359.726	35	405.3834	58	451.4491		
13	363.6568	36	407.3006	59	453.4639		
14	367.5422	37	409.2328	60	455.4732		
15	371.3823	38	411.1787	61	457.4765		
16	373.8425	39	413.1372	62	459.4732		
17	375.1774	40	415.1071	63	461.4628		
18	376.5582	41	417.0872	64	463.4452		
19	377.9827	42	419.0765	65	465.4217		
20	379.4504	43	421.0739	66	467.3899		
21	380.9608	44	423.0791	67	469.3492		
22	382.5117	45	425.0932	68	471.2992		

ตารางผนวกข.7 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.225	23	389.146	46	439.4122	69	490.4476
1	314.032	24	391.1375	47	441.6922	70	492.5468
2	318.7909	25	393.1564	48	443.9733	70.29167	493.1565
3	323.5017	26	395.2013	49	446.253		
4	328.1643	27	397.2703	50	448.53		
5	332.7842	28	399.3624	51	450.8036		
6	337.3574	29	401.4784	52	453.073		
7	341.8817	30	403.6149	53	455.3373		
8	346.3571	31	405.7695	54	457.596		
9	350.7835	32	407.9408	55	459.8483		
10	355.1633	33	410.1275	56	462.094		
11	359.4988	34	412.328	57	464.3339		
12	363.7856	35	414.5412	58	466.5658		
13	368.0238	36	416.7658	59	468.7891		
14	372.2135	37	419.0006	60	471.0032		
15	374.4302	38	421.245	61	473.2077		
16	376.1306	39	423.4997	62	475.4021		
17	377.8758	40	425.7613	63	477.5859		
18	379.6639	41	428.0284	64	479.7586		
19	381.4909	42	430.3	65	481.92		
20	383.3544	43	432.5752	66	484.0708		
21	385.2526	44	434.8529	67	486.2092		
22	387.1838	45	437.1322	68	488.3349		

ตารางผนวกข.6 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของฟางข้าวทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 698.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.15	25	399.2588	49	459.3711
1	314.3026	26	401.651	50	461.8849
2	319.405	27	404.0627	51	464.392
3	324.4574	28	406.4924	52	466.8911
4	329.4632	29	408.9385	53	469.3813
5	334.419	30	411.3996	54	471.8621
7	344.1758	31	413.8742	55	474.3329
8	348.9767	32	416.3609	56	476.7932
9	353.7295	33	418.8585	57	479.2423
10	358.4319	34	421.3677	58	481.6802
11	363.0826	35	423.8853	59	484.1065
12	367.6816	36	426.4096	60	486.5198
13	372.2288	37	428.9396	61	488.9199
14	374.7563	38	431.4741	62	491.3063
15	376.8143	39	434.0119	62.77917	493.1559
16	378.9122	40	436.552		
17	381.0477	41	439.0934		
18	383.219	42	441.6363		
19	385.4239	43	444.1792		
20	387.6606	44	446.7206		
21	389.9272	45	449.2594		
22	392.2219	46	451.7948		
23	394.5426	47	454.3257		
24	396.8881	48	456.8514		

ข3. ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองในกรณีซังข้าวโพด

ตารางผนวกข.9 ผลที่ได้จากการทดลองของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.1917	24	360.1667	48	379.6333	72	387.375
1	310.775	25	361.9583	49	379.7667	73	387.8333
2	312.625	26	363.9917	50	380.05	74	388.225
3	314.4833	27	365.6	51	380.2333	75	388.5
4	316.5083	28	367.0167	52	380.5	76	389.1083
5	318.7833	29	368.4667	53	380.725	77	389.6917
6	320.9167	30	369.7833	54	380.95	78	390.1
7	323.2417	31	370.7667	55	381.2583	79	389.625
8	325.5417	32	372.2083	56	381.475	80	391.2083
9	327.95	33	372.6167	57	381.725	81	391.9167
10	330.2833	34	373.9417	58	382.1917	82	392.6083
11	332.6333	35	374.6333	59	382.55	83	393.125
12	334.9583	36	375.55	60	382.8917	84	393.7583
13	337.4667	37	376.2583	61	383.2417	85	394.3083
14	339.7833	38	376.7	62	383.125	86	394.9417
15	342.1167	39	377.175	63	383.8417	87	395.6583
16	344.4	40	377.6167	64	384.0333	88	396.3083
17	346.6083	41	377.9083	65	384.3667	89	397.175
18	348.8	42	378.175	66	384.8833	90	398.0833
19	350.8667	43	378.5	67	385.2417	91	398.8333
20	352.7833	44	378.725	68	385.525	92	399.5583
21	354.9083	45	378.9583	69	386.2	93	399.325

ตารางผนวกข.9 ผลที่ได้จากการทดลองของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 623.15 K (ต่อ)

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
94	400.8333	118	422.9917	142	454.8333	166	489.5583
95	401.6417	119	424.1583	143	455.85	167	491.0167
96	402.525	120	424.9833	144	457.125	167.55	493.1583
97	403.2667	121	426.5083	145	458.0417		
98	404.1583	122	427.35	146	459.0917		
99	405.1333	123	428.55	147	461.85		
100	405.875	124	430.05	148	463.4167		
101	406.825	125	431.3833	149	465		
102	407.55	126	432.55	150	466.5167		
103	408.4	127	433.6833	151	467.0833		
104	409.2583	128	435.025	152	469.575		
105	410.25	129	436.2333	153	471.1		
106	411.15	130	437.5667	154	470.5		
107	412.1417	131	438.7417	155	472.75		
108	412.8417	132	440.2833	156	475.4		
109	413.5667	133	441.5083	157	477.025		
110	414.6	134	442.6667	158	478.4833		
111	415.8	135	444.1333	159	479.95		
112	416.775	136	445.925	160	480.35		
113	417.8333	137	447.6083	161	482.2083		
114	418.8417	138	448.5833	162	483.3167		
115	419.8917	139	449.8833	163	485.3333		
116	420.8417	140	451.5833	164	486.6167		
117	421.9333	141	453.3167	165	488.2083		

ตารางผนวกข.9 ผลที่ได้จากการทดลองของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 648.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.1583	24	367.475	48	379.3917	72	389.5083
1	310.8917	25	368.8833	49	380.6083	73	390.0417
2	312.7667	26	370.1667	50	381.3083	74	390.825
3	314.9417	27	372.0667	51	381.3833	75	391.4083
4	317.3833	28	373.2167	52	381.4	76	392.0083
5	319.6667	29	374.0917	53	381.6917	77	392.625
6	322.2167	30	374.725	54	381.75	78	393.4333
7	325.0083	31	375.3167	55	382.35	79	395.275
8	327.65	32	376.025	56	382.675	80	396.0333
9	330.6917	33	376.5	57	383.0833	81	396.7583
10	333.025	34	376.9167	58	383.4917	82	397.5417
11	336.0917	35	377.25	59	383.75	83	398.2167
12	339.2667	36	377.525	60	384.1833	84	398.4
13	342.2333	37	377.8	61	384.6917	85	399.2833
14	344.7167	38	378.075	62	384.3917	86	400.1833
15	347.2167	39	378.4583	63	385.0167	87	401.1417
16	349.6833	40	377.5583	64	385.5417	88	402.1583
17	352.3667	41	378	65	386.075	89	402.55
18	355.5083	42	378.3333	66	386.4583	90	403.65
19	357.475	43	379.4667	67	387.05	91	404.7417
20	360.1417	44	379.7667	68	387.4	92	405.875
21	361.4417	45	379.925	69	387.8917	93	407.5917
22	363.65	46	378.4917	70	388.3333	94	409.0833
23	365.4083	47	378.8917	71	388.8833	95	409.3917

ตารางผนวกข.9 ผลที่ได้จากการทดลองของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 648.15 K (ต่อ)

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
96	410.6833	120	444.8917	144	484.5417
97	412.1833	121	446.6417	145	486.425
98	413.425	122	448.1667	146	488.2667
99	414.65	123	449.825	147	489.7917
100	415.9917	124	451.475	148	491.25
101	417.5	125	453.0417	148.9833	493.1583
102	420.225	126	454.6917		
103	421.45	127	456.4		
104	422.75	128	458.425		
105	424.925	129	460.7083		
106	425.2333	130	461.9417		
107	426.0333	131	465.225		
108	426.5583	132	465.9083		
109	428.8833	133	464.925		
110	430.625	134	466.4417		
111	432.1083	135	468.0083		
112	433.325	136	469.6417		
113	434.4167	137	471.375		
114	437.1417	138	473.0833		
115	437.4667	139	474.8083		
116	439.475	140	477.125		
117	440.475	141	479.2083		
118	443.9167	142	480.7333		
119	443.375	143	482.5333		

ตารางผนวกข.9 ผลที่ได้จากการทดลองของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.1833	24	370.6583	48	379.575	72	397.6417
1	311.4333	25	370.9	49	380.1083	73	398.9667
2	313.8	26	371.4917	50	381.1917	74	400.0083
3	316.525	27	372.3083	51	380.7333	75	401.1917
4	319.325	28	372.825	52	381.3917	76	402.4
5	322.2583	29	373.2917	53	381.7667	77	403.5917
6	325.25	30	373.6833	54	382.2667	78	404.9167
7	328.4833	31	373.7333	55	382.7667	79	406.475
8	331.8667	32	374.1917	56	383.3917	80	407.7917
9	335.4917	33	374.525	57	384.5	81	409.05
10	338.575	34	375.0917	58	384.8917	82	410.4667
11	341.7333	35	375.325	59	385.5333	83	411.9583
12	344.7167	36	375.5167	60	387.5833	84	413.525
13	347.6	37	376	61	387.225	85	415.0167
14	350.5417	38	376.5	62	388.0833	86	416.5583
15	353.0917	39	376.3083	63	388.7917	87	418.1833
16	355.85	40	376.625	64	389.8083	88	419.8333
17	358.2833	41	376.875	65	390.575	89	421.4667
18	360.4833	42	377.625	66	391.85	90	423.1417
19	362.825	43	378.0583	67	392.4667	91	424.8667
20	366.0333	44	378.9167	68	393.4667	92	426.8083
21	367.1333	45	378.775	69	394.3833	93	429.0167
22	368.5667	46	379.6333	70	395.4833	94	430.7833
23	369	47	379.45	71	396.575	95	432.825

ตารางผนวกข.9 ผลที่ได้จากการทดลองของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 673.15 K (ต่อ)

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)
96	434.8583	120	216.7833	489.9333
97	436.4417	121	219.6917	492.8417
98	438.8417	121.1167	220	493.15
99	440.7417			
100	443.4917			
101	445.7583			
102	448.0083			
103	450.6917			
104	452.05			
105	454.075			
106	456.0083			
107	458.1083			
108	460.45			
109	462.8667			
110	464.825			
111	467.025			
112	469.5			
113	471.9083			
114	476.3917			
115	478.2667			
116	480.2083			
117	482.025			
118	484.5417			
119	487.0917			

ตารางผนวกข.9 ผลที่ได้จากการทดลองของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 698.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ(K)	เวลา(min)	อุณหภูมิ(K)
0	309.16667	26	373.9	52	384.825	78	424.68333
1	311.39167	27	374.39167	53	385.65	79	426.45
2	313.95833	28	374.925	54	387.3	80	429.98333
3	316.79167	29	376.05833	55	388.275	81	432.30833
4	319.825	30	376.33333	56	389.175	82	434.925
5	323.06667	31	376.59167	57	390.025	83	437.58333
6	326.41667	32	376.875	58	390.81667	84	440.45833
7	329.96667	33	377.11667	59	391.78333	85	443.24167
8	333.23333	34	377.36667	60	392.95833	86	446.21667
9	336.81667	35	376.575	61	394.14167	87	449.06667
10	340.35833	36	377.575	62	395.35833	88	452.26667
11	343.675	37	378.05833	63	396.61667	89	455.20833
12	347.04167	38	377.80833	64	397.475	90	458.325
13	350.44167	39	378.78333	65	399.65	91	461.29167
14	353.46667	40	379.125	66	401.225	92	464.33333
15	356.73333	41	379.34167	67	402.69167	93	467.58333
16	359.60833	42	379.84167	68	404.30833	94	470.5
17	362.30833	43	380.38333	69	405.83333	95	473.64167
18	364.85833	44	380.775	70	408.00833	96	476.56667
19	366.75	45	380.78333	71	409.90833	97	479.65
20	368.21667	46	381.63333	72	411.69167	98	482.875
21	369.51667	47	382.20833	73	413.675	99	486.39167
22	370.85	48	382.43333	74	415.1	100	489.45
23	371.75833	49	382.71667	75	417.89167	101	492.85833

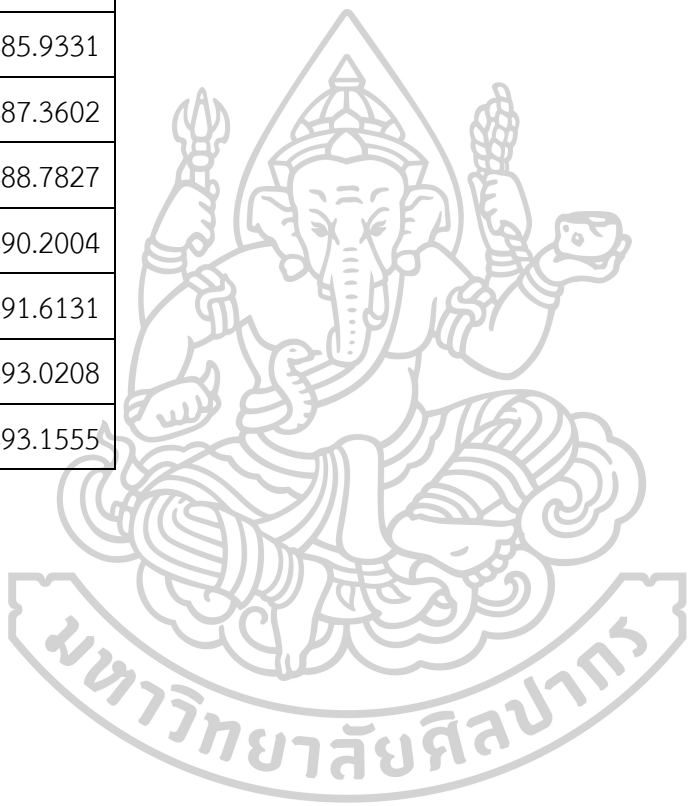
ข4. ผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่นชนิดเทอร์โมไซฟอนจากแบบจำลองฯในกรณีซังข้าวโพด

ตารางผนวกข.10 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 698.15 K

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
0	309.15	26	375.2688	52	405.6487	78	443.2058
1	312.026	27	376.1963	53	407.0107	79	444.6964
2	314.8899	28	377.1488	54	408.3822	80	446.1889
3	317.7412	29	378.1246	55	409.7628	81	447.6825
4	320.5772	30	379.1232	56	411.1533	82	449.1761
5	323.3974	31	380.1439	57	412.5537	83	450.6694
6	326.2016	32	381.186	58	413.9623	84	452.1622
7	328.9902	33	382.2489	59	415.3782	85	453.6542
8	331.7658	34	383.3318	60	416.801	86	455.1451
9	334.529	35	384.4343	61	418.2302	87	456.6349
10	337.2793	36	385.5556	62	419.6655	88	458.1232
11	340.0152	37	386.6953	63	421.1066	89	459.6099
12	342.7349	38	387.8526	64	422.553	90	461.0949
13	345.4384	39	389.0271	65	424.0045	91	462.5789
14	348.1255	40	390.218	66	425.4605	92	464.0614
15	350.7964	41	391.4252	67	426.9208	93	465.5416
16	353.4533	42	392.6492	68	428.3857	94	467.0193
17	356.0972	43	393.8896	69	429.8561	95	468.4942
18	358.7277	44	395.1457	70	431.3302	96	469.9663
19	361.3422	45	396.4158	71	432.8074	97	471.4353
20	363.9402	46	397.6991	72	434.2872	98	472.9011
21	366.5219	47	398.9952	73	435.7693	99	474.3636

ตารางผนวกข.10 ผลที่ได้จากแบบจำลองฯของซังข้าวโพดทอรีไฟร์ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 698.15 K(ต่อ)

เวลา (min)	อุณหภูมิ (K)
104	481.6244
105	483.065
106	484.5013
107	485.9331
108	487.3602
109	488.7827
110	490.2004
111	491.6131
112	493.0208
112.0958	493.1555

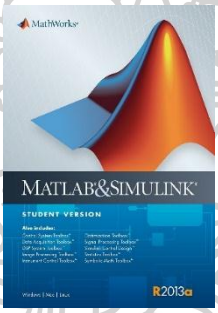


ภาคผนวก ค

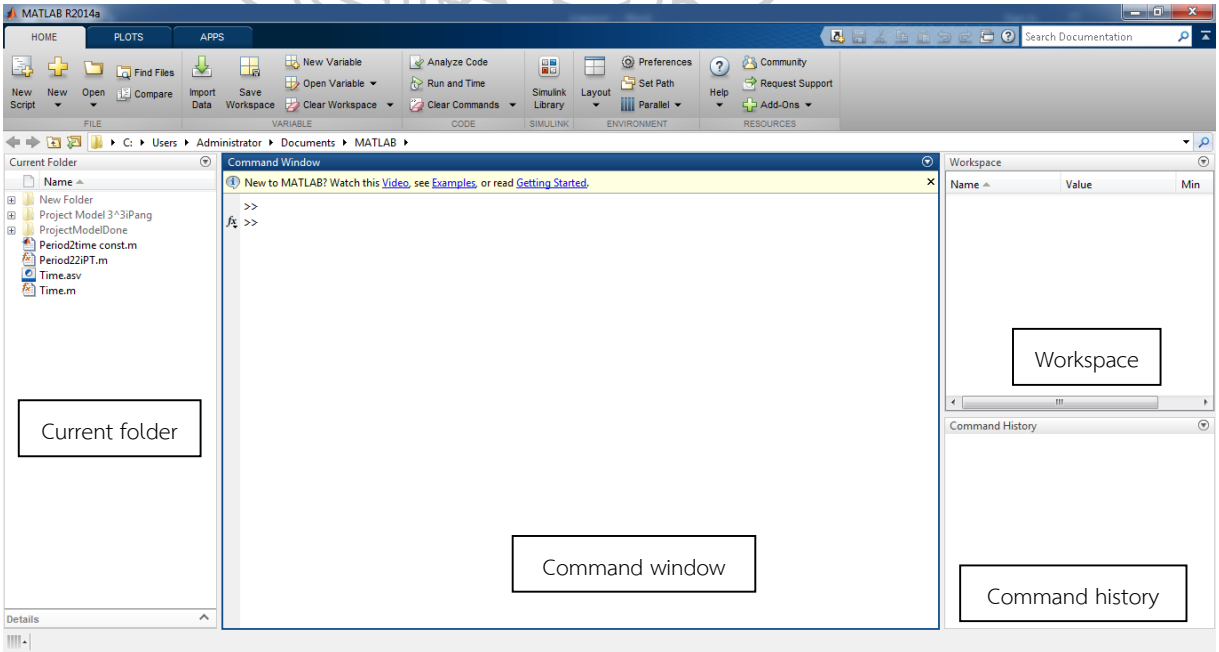
คู่มือการใช้งานโปรแกรม Matlab2014

ค.1 โปรแกรม Matlab 2014 เบื้องต้น

โปรแกรม Matlab เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชนิดหนึ่งของ The Mathworks, Inc. (http://www.mathworks.com) เพื่อใช้สำหรับช่วยในการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์และแสดงผลได้ทั้งตัวเลขและรูปภาพที่มีความสามารถในการคำนวณ Matrix ชุดคำสั่งของ Matlab เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ ทำงานในลักษณะการป้อนชุดคำสั่งและประมวลผล ลักษณะการเขียนโปรแกรม Matlab จะคล้ายกับการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ จึงมีฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในทางวิศวกรรม สำหรับการทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows สามารถเริ่มการทำงานของ Matlab ได้โดยการคลิกที่ Shortcut ของ Matlab ที่ปรากฏอยู่บน Desktop หรือคลิก Start แล้วเลือก Matlab สำหรับไอคอนของโปรแกรม Matlab แสดงดังภาพผนวก ค.1



ภาพผนวก ค.1 แสดง Short cut ของ Matlab



ภาพผนวก ค.2 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Matlab

การติดตั้งโปรแกรม MATLAB สู่เครื่องคอมพิวเตอร์จะต้องใช้ระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดว์เวอร์ชัน XP หรือสูงกว่า หลังจากติดตั้งโปรแกรม Matlab แล้วสามารถเข้าสู่โปรแกรมโดยการดับเบิลคลิกที่ไอคอนของโปรแกรม Matlab ที่เดสทอปของวินโดวส์ เมื่อเปิดโปรแกรมมีส่วนประกอบดังแสดงในภาพผนวกข. 2 ดังนี้

• Current folder คือ พื้นที่สำหรับเก็บชุดคำสั่งบน M – file สำหรับการเรียกใช้งานแบบ Real time ซึ่งสามารถจัดเก็บได้หลาย M - file

• Command window คือ พื้นที่ที่ใชในการปอนชุดคำสั่งเพื่อให Matlab ทำงานตามชุดคำสั่งนั้นและจะแสดงผลที่เปนตัวหนังสือในหนาตางนี้ การป้อนคำสั่งที่ Command Window จะทำให้ Matlab ได้รับคำสั่งเกือบทั้งหมด ในหนาตางนี้ เมื่อ Matlab พรอมที่จะรับคำสั่งจะแสดงเครื่องหมาย “ >> ” แต่การปอนชุดคำสั่งเหลานี้อาจจะกำหนดผานทาง File ที่เขียนขึ้นเปนชุดคำสั่งใหกับ Matlab หรือ M-file

• Command history คือ หนาตางสำหรับแสดงประวัติการเข้าใช้งานซึ่งการใชคำสั่งจะไดรับการบันทึกไวทุกครั้งที่มีการเปดโปรแกรม Matlab ขึ้นมาใชรวมถึงเวลาในการใชโปรแกรมนี้ในแตละครั้งดวย ในหนาตางนี้เราสามารถที่จะเลือกใชคำสั่งก่อนหนานี้โดยการ Double click ที่คำสั่งนั้น

• Workspace คือ หน้าต่างสำหรับเก็บค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ คาเหลานั้นจะถูกเก็บไวในพื้นที่การทำงาน Workspace และหนวยความจำของ Matlab สามารถเพิ่มตัวแปรลงใน Workspace ไดดวยการใชคำสั่งให้ M - file ทำงานหรือ Load คาที่บันทึกไวเขาสู Workspace เพื่อที่จะดูวาในขณะนั้นมีตัวแปรอะไรบาง

• Editor คือ หน้าต่างสำหรับเขียนชุดคำสั่งของโปรแกรมซึ่งจะมีลักษณะการใช้งานคล้ายๆ กับการเขียนภาษา C อาจเรียกอีกอย่างได้ว่า M – file

ค. 2 วิธีการใช้งานโปรแกรม Matlab

สามารถใช้งานได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

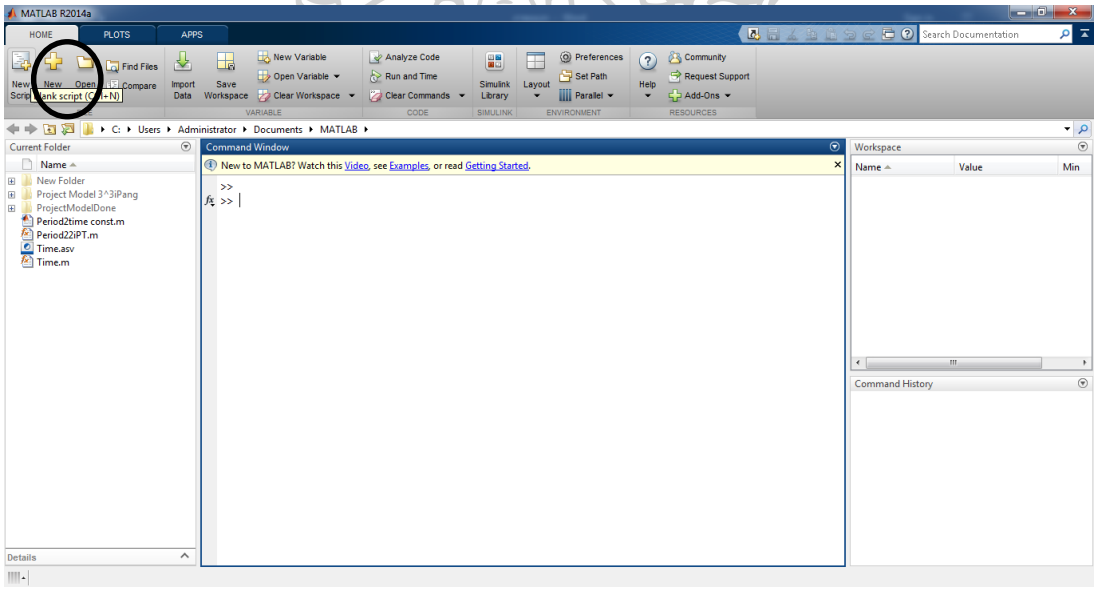
ค. 2.1 เริ่มต้นการใช้งาน เรียกโปรแกรม Matlab ขึ้นมาจะปรากฏหน้าต่างของ Matlab จากนั้นดำเนินการสร้างชุดคำสั่งเพื่อเรียกหน้าต่าง Editor โดยการคลิก New script ดังแสดงในภาพผนวก ค. 3 และค. 4 ตามลำดับ

ค. 2.2 ในหน้า Editor สามารถเขียนชุดคำสั่งได้ดังแสดงในภาพผนวก ค. 5

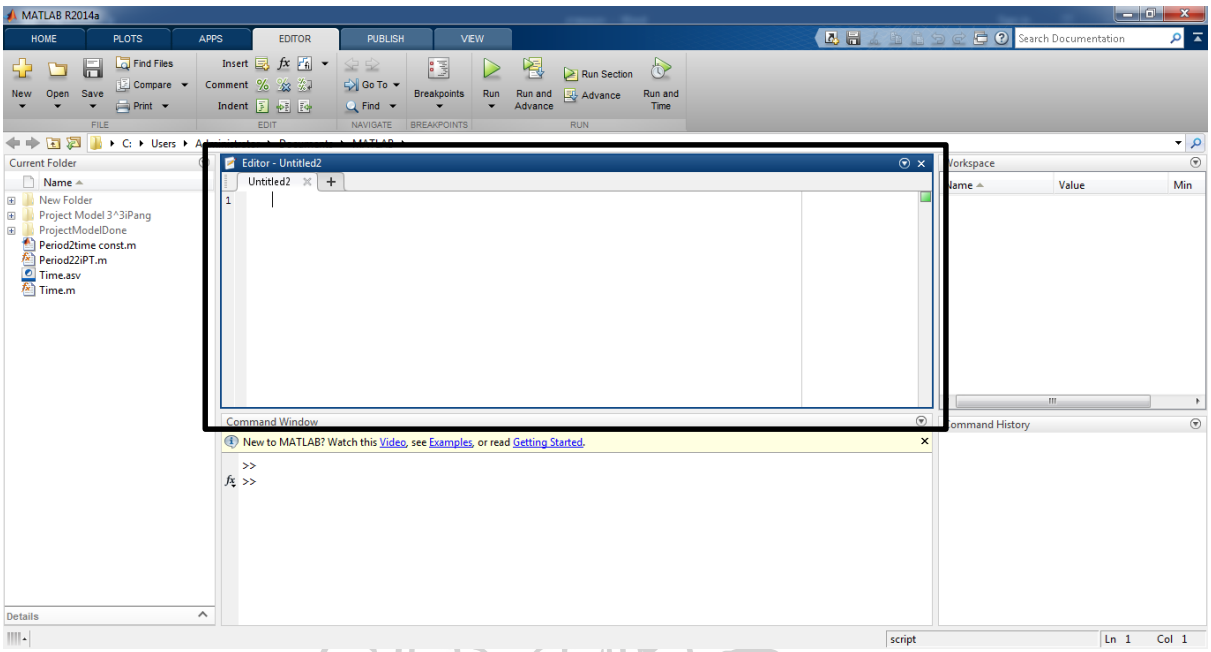
ค. 2.3 สามารถกดรันโปรแกรมเพื่อประมวลผล ซึ่งสามารถคลิกได้ทั้งสองปุ่ม Run โปรแกรมจะดำเนินการประมวลผลทันที ถ้าคลิก Run and time โปรแกรมจะดำเนินการประมวลผลทันทีพร้อมรายละเอียดของการประมวลผลจะถูกบันทึกไว้ได้ดังแสดงในภาพผนวก ค. 6 และ ค. 7

ค. 2.4 ผลของการประมวลจะถูกแสดงผลใน Command window และรายละเอียดการประมวลผลของโปรแกรมจะถูกในหน้าต่าง Profiler ดังแสดงในภาพผนวก ค. 7 และ ค. 8

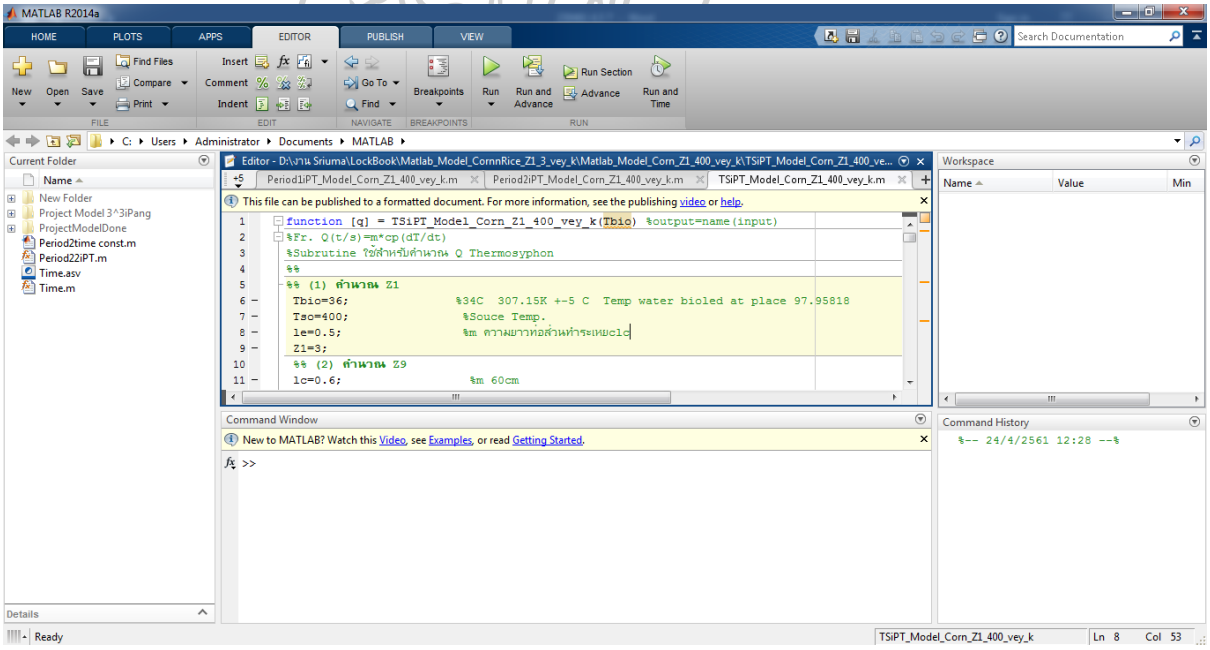
ค. 2.5 นอกจากนี้ โปรแกรม Matlab ยังสามารถแสดงผลเป็นรูปแบบของกราฟได้อีกด้วยดังแสดงในภาพผนวก ค. 9



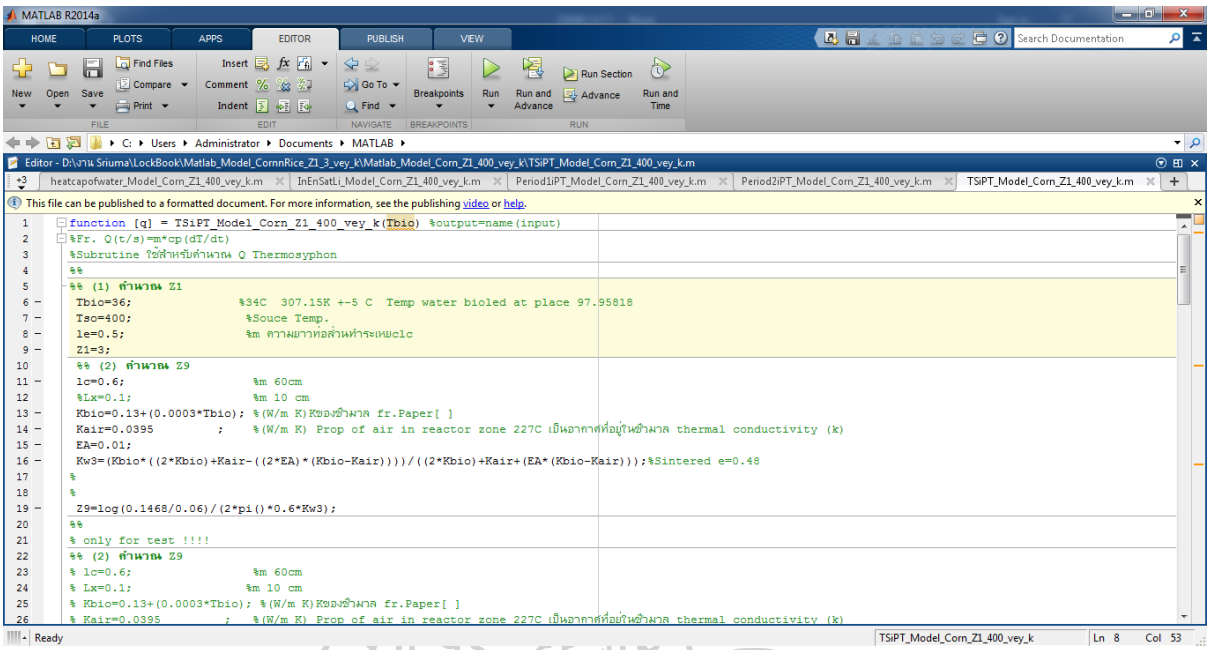
ภาพผนวก ค.3



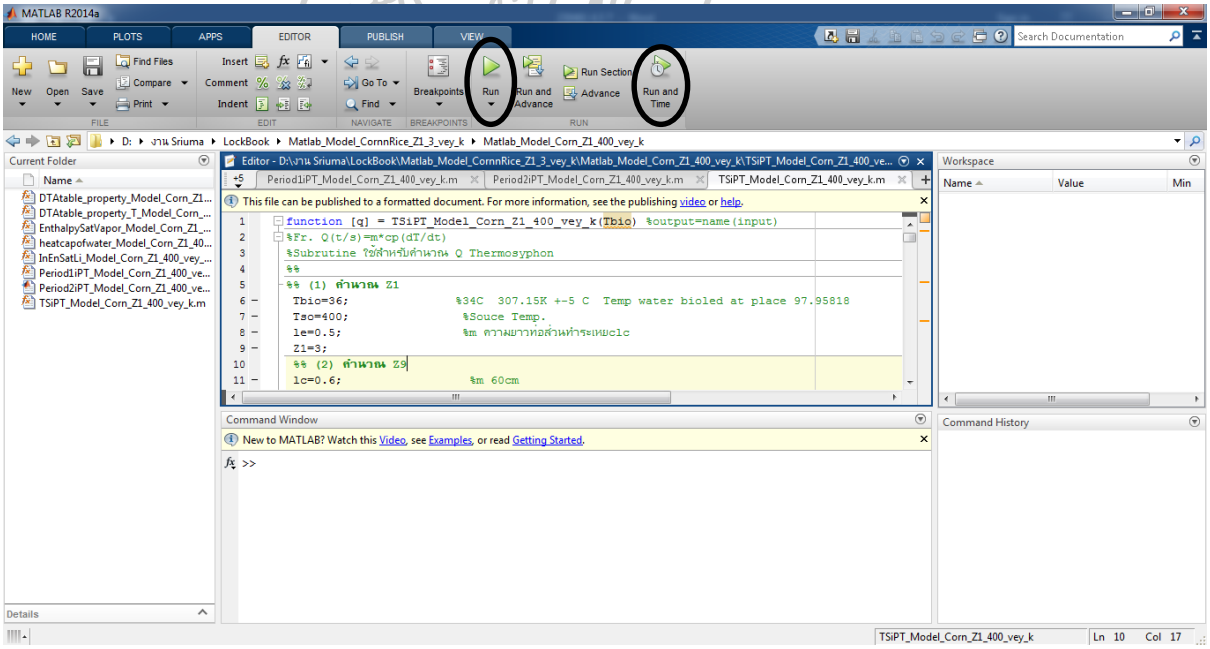
ภาพผนวก ค. 4



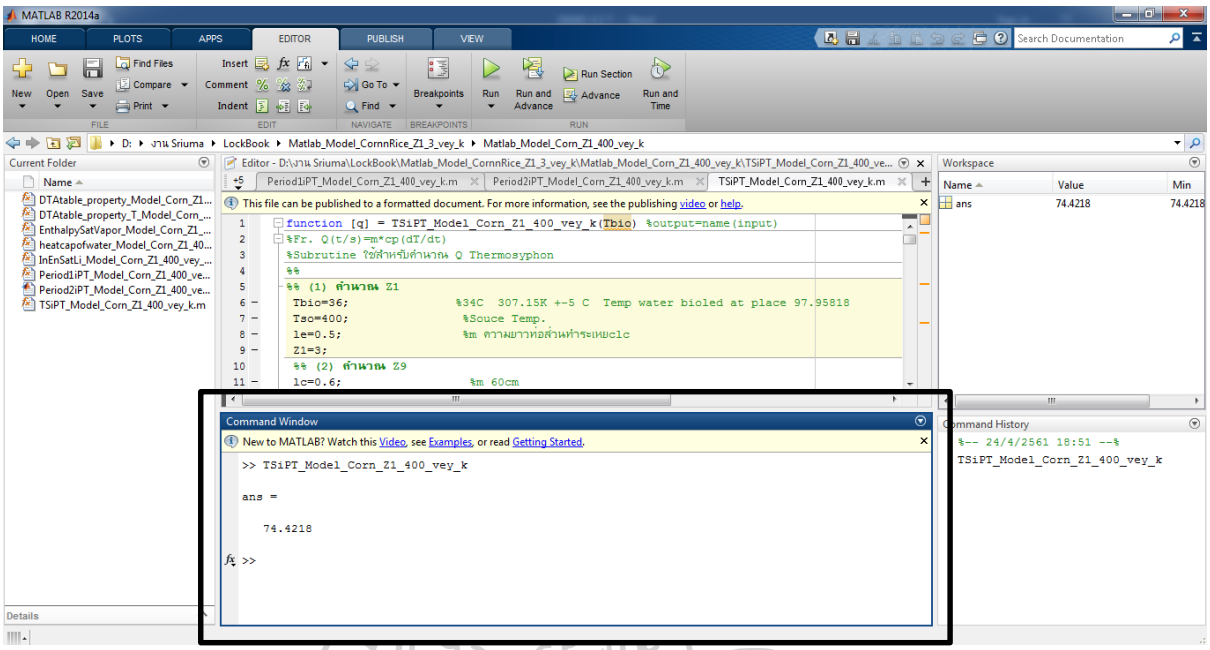
ภาพผนวก ค. 5



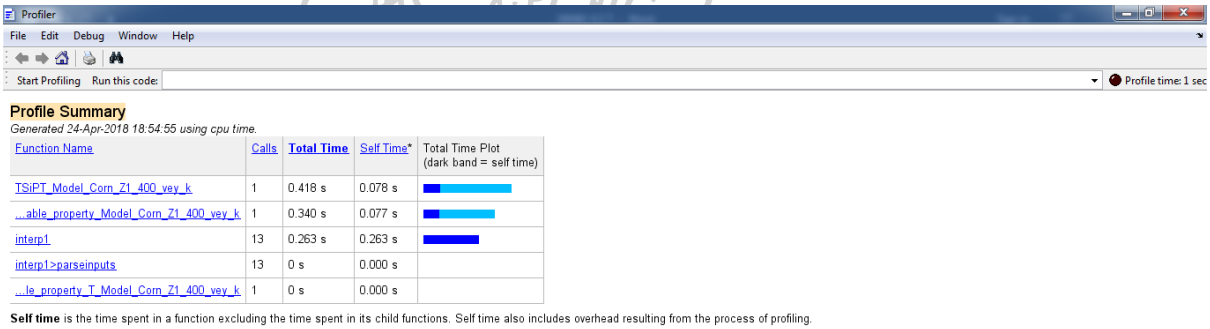
ภาพผนวก ค. 6



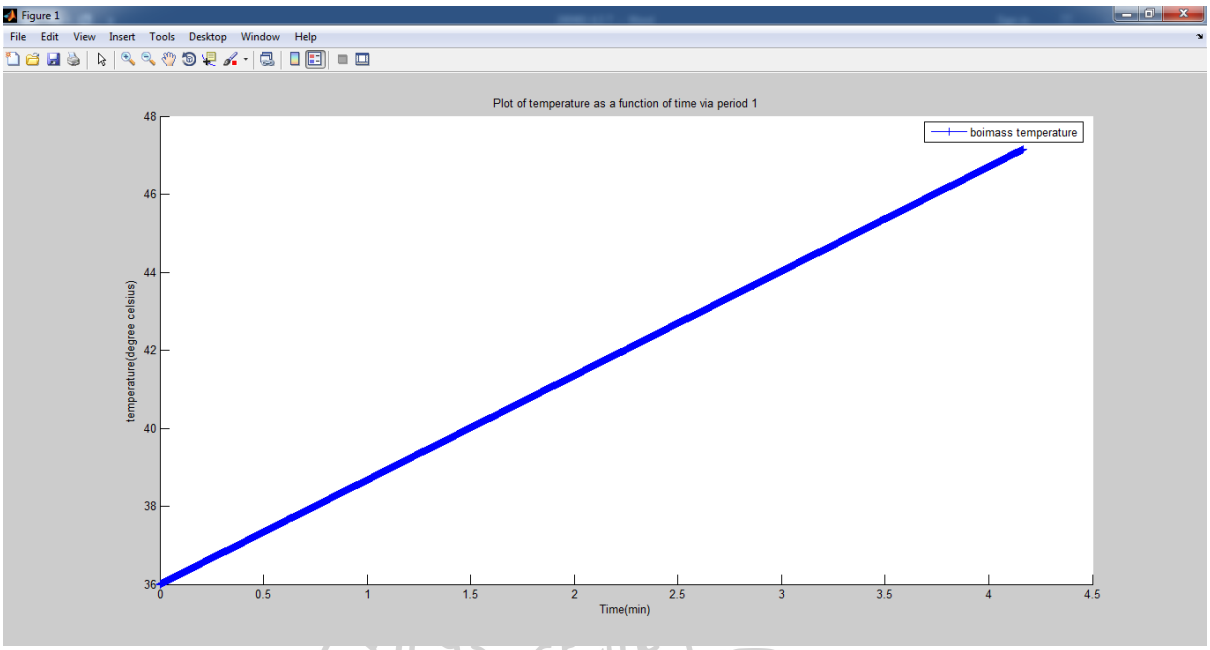
ภาพผนวก ค. 7



ภาพผนวก ค. 8



ภาพผนวก ค. 9



ภาพผนวก ค. 9

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ค.3 วิธีการเขียนและประมวลผลของโปรแกรม Matlab

สามารถเขียนชุดคำสั่งลงในหน้า Editor หรือ Command window ได้ ดังนี้

1. ป้อนคำสั่ง function [ตัวแปร out put] = ชื่อไฟท์(ตัวแปร Input)

เช่น

function [Z2] = Z2(D,Do,le,k)

2. ป้อนคำสั่ง ตัวแปร In put

เช่น

le=0.5;

Do=0.06;

t=0.005;

D=Do-2*t;

k=36;

3. ป้อนสมการที่ต้องการคำตอบหรือเรียกว่าตัวแปร Out put

เช่น

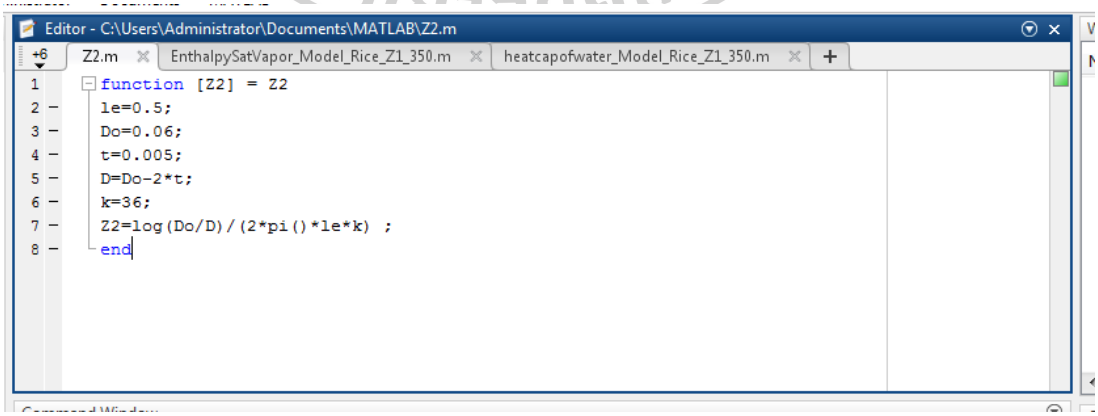
Z2=log(Do/D)/(2*pi()*le*k) ;

4. ป้อนคำสั่ง End ซึ่งจะต้องใช้คู่กับคำสั่ง function เสมอ

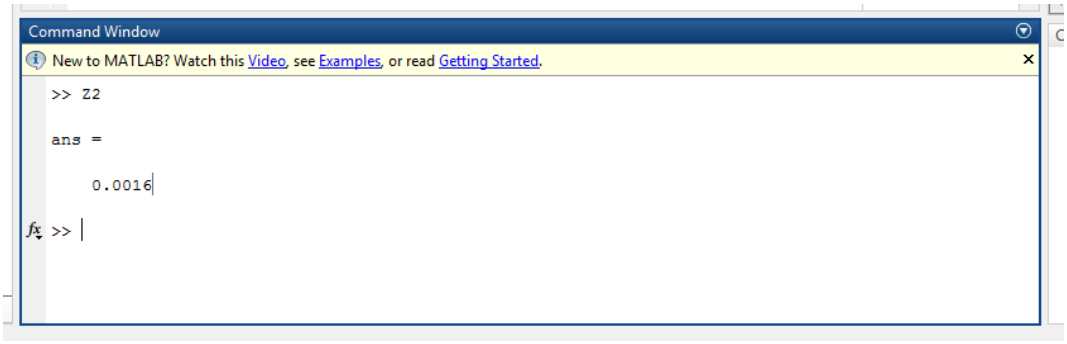
เช่น

End

นั่นคือ

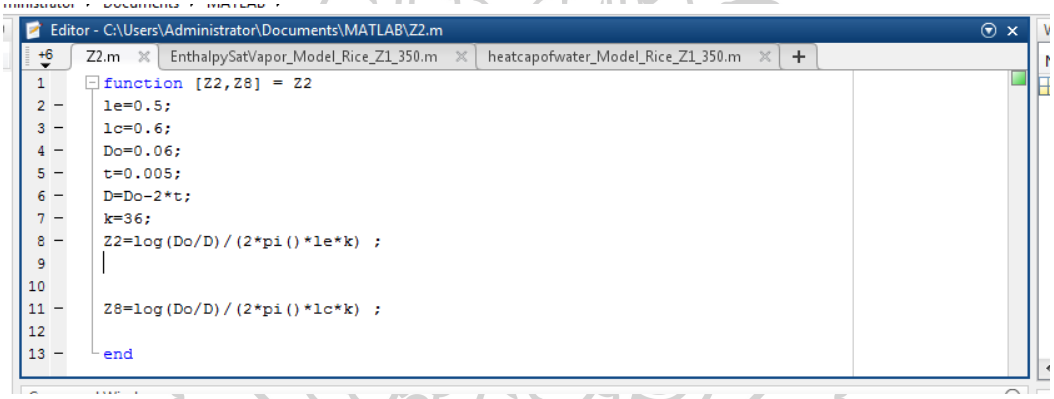


5. กดปุ่ม Run โปรแกรมจะทำการแสดงผลที่หน้า Command window ดังนี้

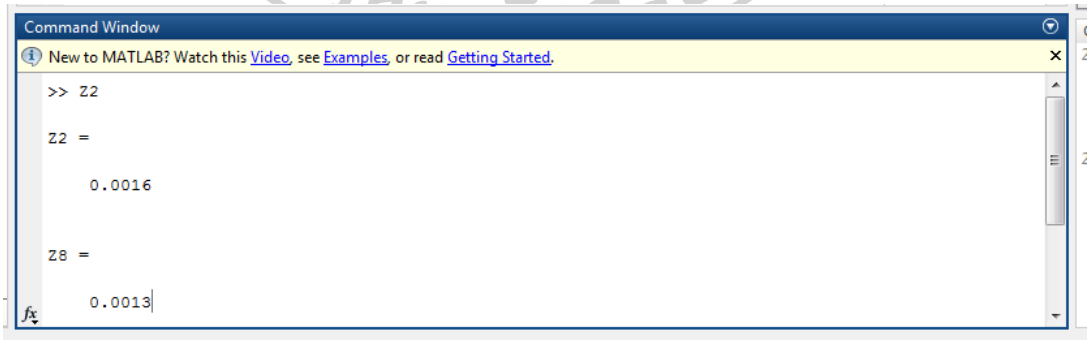


นอกจากนี้ การป้อนคำสั่งสามารถทำได้มากกว่า 1 ชุดคำสั่งต่อหน้า Editor ดังนี้

6. ป้อนชุดคำสั่ง Z8



7. กดปุ่ม Run โปรแกรมจะทำการแสดงผลที่หน้า Command window ดังนี้



ค.3.1 ตัวอย่างชุดคำสั่ง

ค.3.1.1 คำนวณอัตราการส่งผ่านความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน

```
function [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_350(Tbio)
 (1) คำนวณ Z1
 Tbio=36;
 Tso=400;
 le=0.5;
 Z1=0.5;
  (2) คำนวณ Z9
 lc=0.6;
 Lx=0.1;
 Kbio=0.13+(0.0003*Tbio);
 Kair=0.0395
 Kw3=(Kbio*((2*Kbio)+Kair-((2*0.48)*(Kbio-Kair))))/((2*Kbio)+Kair+(0.48*(Kbio-Kair)));
Z9=log(0.1468/0.06)/(2*pi()*0.6*Kw3);
(3) คำนวณ Z2 และ Z8
Do=0.06;
t=0.005;
D=Do-2*t;
F=1.5/0.5;
F=0.0561;
k=36;
Z2=log(Do/D)/(2*pi()*le*k) ;
Z8=log(Do/D)/(2*pi()*lc*k) ;
(4) คำนวณ Z และ Tv
Z=Z1+Z2+Z8+Z9;
Tv=Tbio+(Z8+Z9)/Z*(Tso-Tbio)   ;
 (5) Find property  of dowthermA
```

มหาวิทยาลัยศิลปากร

```
[ Uncer,pv,Denl,Denv,L,csl,visl,visv,kl,sur,FM1,FM2 ]
=DTAtable_property_Model_Rice_Z1_350(Tv);
 (6) คำนวณ Del_Th
g=9.81;
h=0.25;
pp=pv+Denl*g*h;
Tp=DTAtable_property_T_Model_Rice_Z1_350(pp) ;
del_Th=(Tp-Tv)/2*F;
 (7) คำนวณ Del_T
del_T=Tso-Tbio-del_Th;
 (8) คำนวณ Q
q=del_T/Z;
del_q=100;
while del_q>1;    q_old=q;
 (9) คำนวณ Z3f
    C=0.235;
FM2=((L*((kl)^3)*(Denl)^2)/(visl))^0.25;
    Z3f=C*q^(1/3)/(D^(4/3)*g^(1/3)*le*FM2^(4/3))  ;
    Ref=4*q/(L*visl*pi*D);
  (10) คำนวณ Z3p
    pa=101325;
    FM3=(0.32*Denl^0.65*kl^0.3*csl^0.7)/(Denv^0.25*L^0.4*visl^0.1)*(pv/pa)^0.23;
    Z3p=1/(FM3*g^0.2*q^0.4*(pi*D*le)^0.6)    ;
    (11) คำนวณ Z3
    if Z3p<Z3f;
        Z3=Z3p;
    else
        Z3=Z3p*F+Z3f*(1-F)            ;
    end
     (12) คำนวณ Z7
    Z7=C*q^(1/3)/(D^(4/3)*g^(1/3)*lc*FM2^(4/3))  ;
```

```
    Z7Tur=0.335*q^(1/3)/(D*g^(1/3)*lc^(1/3)*FM2^(4/3)) ;
    if Ref>1300;
    Z7=Z7SV*191*(Ref)^(-0.773)  ;
    else Z7=Z7SV;
    end
    (13) คำนวณ Z Q

    Z=Z1+Z2+Z3+Z7+Z8+Z9
    q=del_T/Z;
    q_new=q;
    del_q=((abs(q_new-q_old))/q_old)*100;
end
end
```

ค.3.1.2 ชุดคำสั่งของการคำนวณอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในระยะที่ 1

```
function [Tt] = Period1iPT_Model_Rice_Z1_425
 mbio=2.4;
 cbio=1336;
 Tbio=36;
 Tt=[0,36];
 h=0.25;
 MR=9.24;
for i=1:12000
    [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(Tbio);
    [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(Tbio);
    K1=(5*q)/(mbio*(((1-(MR/100))*cbio)+((MR/100)*cpw))) ;
     TbioA=Tbio+((1/2)*h*K1);
     [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(TbioA);
     [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(TbioA);
```

```
    K2=(5*q)/(mbio*(((1-(MR/100))*cbio)+((MR/100)*cpw)));
    TbioB=Tbio+((1/2)*h*K2);
    [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(TbioB);
    [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(TbioB);
    K3=(5*q)/(mbio*(((1-(MR/100))*cbio)+((MR/100)*cpw)));
    TbioC=Tbio+(h*K3);
    [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(TbioC);
    [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(TbioC);
    K4=(5*q)/(mbio*(((1-(MR/100))*cbio)+((MR/100)*cpw)));
     Tbio2=Tbio+(((1/6)*(K1+(2*K2)+(2*K3)+K4))*h);
     Tbio=Tbio2;
     Tt(end+1,1:2)=[((i*h)/60),Tbio]
end
  hold on
  plot(Tt(:,1),Tt(:,2),'+-', 'Linewidth', 1 , 'color', 'blue')
  title('Plot of temperature as a function of time via period 1');
  xlabel('Time(min)'); ylabel('temperature(degree celsius)');
  legend('boimass temperature');
```

ค.3.1.3 ชุดคำสั่งของการคำนวณอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในระยะที่ 2

```
mbio=2.4000;
cbio=1336;
MR=9.2400;
MRE=1.8152;
k=4*(10^-4);
n=1;
tP1=853.75;
t(1) = 853.75;
Tbio(1) = 100;
```

```
 h = 0.25;
for i = 1:42000
    [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(Tbio(i));
    [hg]=EnthalpySatVapor_Model_Rice_Z1_425(Tbio(i));
    [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(Tbio(i));
    [uf]=InEnSatLi_Model_Rice_Z1_425(Tbio(i));
    K1=((5*q)-((hg-uf)*(abs(((((MR*mbio)/100)-((MRE*mbio)/100))*(-k*n*(exp(-k*((t(i)-
tP1)^n)))*((t(i)-tP1)^(n-1)))))))/(((mbio*(1-(MR/100)))*cbio)+((mbio*(MR/100))*cpw));
    TbioA=Tbio(i)+((1/2)*h*K1);
    [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(TbioA);
    [hg]=EnthalpySatVapor_Model_Rice_Z1_425(TbioA);
    [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(TbioA);
    [uf]=InEnSatLi_Model_Rice_Z1_425(TbioA);
    K2=((5*q)-((hg-uf)*(abs(((((MR*mbio)/100)-((MRE*mbio)/100))*(-k*n*(exp(-k*((t(i)-
tP1)^n)))*((t(i)-tP1)^(n-1)))))))/(((mbio*(1-(MR/100)))*cbio)+((mbio*(MR/100))*cpw));
    TbioB=Tbio(i)+((1/2)*h*K2);
    [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(TbioB);
    [hg]=EnthalpySatVapor_Model_Rice_Z1_425(TbioB);
    [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(TbioB);
    [uf]=InEnSatLi_Model_Rice_Z1_425(TbioB);
     K3=((5*q)-((hg-uf)*(abs(((((MR*mbio)/100)-((MRE*mbio)/100))*(-k*n*(exp(-k*((t(i)-
tP1)^n)))*((t(i)-tP1)^(n-1)))))))/(((mbio*(1-(MR/100)))*cbio)+((mbio*(MR/100))*cpw));
    TbioC=Tbio(i)+(h*K3);
    [q] = TSiPT_Model_Rice_Z1_425(TbioC);
    [hg]=EnthalpySatVapor_Model_Rice_Z1_425(TbioC);
    [cpw]=heatcapofwater_Model_Rice_Z1_425(TbioC);
    [uf]=InEnSatLi_Model_Rice_Z1_425(TbioC);
    K4=((5*q)-((hg-uf)*(abs(((((MR*mbio)/100)-((MRE*mbio)/100))*(-k*n*(exp(-k*((t(i)-
tP1)^n)))*((t(i)-tP1)^(n-1)))))))/(((mbio*(1-(MR/100)))*cbio)+((mbio*(MR/100))*cpw));
     Tbio(i+1) = Tbio(i)+(1/6*(K1+(2*K2)+(2*K3)+K4))*h;
     t(i+1) = t(i)+h;
```

```
    Data=[t(:),Tbio(:)]
end

hold on
plot(t/60,Tbio,'+-', 'Linewidth', 1.5, 'color', 'blue')
xlabel('Time(min)');
ylabel('Temperatue(degree celsius)');
legend('Period 2');
```

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวศรีอุมา เพชรกล้า
วัน เดือน ปี เกิด	23 มีนาคม 2533
สถานที่เกิด	ยะลา
วุฒิการศึกษา	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนนิบงชนูปถัมภ์ จังหวัดยะลา ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนคณะราษฎรบำรุงจังหวัดยะลา จังหวัดยะลา ระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม
ที่อยู่ปัจจุบัน	2 หมู่ที่ 4 ถนนเพชรเกษม ตำบลเปาะเส้ง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา

มหาวิทยาลัยศิลปากร