



ประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดรั่มหมุน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

# THERMAL PERFORMANCE OF ROTARY DRUM TORREFACTION REACTOR



By

MR. Sran SUBSANTHITIKUL

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of 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 ประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแพคชั้นชนิดครีมหมูน  
โดย ศรัณย์ ทรัพย์สันธิติกุล  
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตพงษ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)  
พิจารณาเห็นชอบโดย  
..... ประธานกรรมการ  
(ดร. ณัฐวุฒิ ชาราวดี )  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตพงษ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ )  
..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ดร. สุระ ตันดี )



56406311 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

นาย ศรัณย์ ทรัพย์สัมฤทธิ์กุล: ประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตพงษ์ ไสภณพงศ์พิพัฒน์

งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการให้ความร้อนและสมดุลพลังงานของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร และยาว 0.80 เมตร เปลือกหุ้มของเตานั้นสร้างจากเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร และยาว 0.90 เมตร ชั้นฉนวนที่ใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 0.05 เมตร ติดตั้งระหว่างดรัมหมุนและผิวด้านในของเปลือกหุ้ม แหล่งให้ความร้อนในงานวิจัยนี้คือ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) แต่ผลการทดลองนั้นจะบรรจุเชื้อเพลิงลงไปดรัมหมุน จำนวน 4 กิโลกรัม ใช้ความเร็วรอบของเตา 3.75 รอบต่อนาที ทำการแปรค่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ 300, 500 และ 700 °C ผลการวิจัยพบว่าเมื่ออุณหภูมิของห้องเผาไหม้เพิ่มจาก 300 °C ถึง 700 °C สัดส่วนของพลังงานความร้อนสูญเสียที่เปลือกหุ้ม และพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มลดลงจาก 12.37% ถึง 6.33% และ 59.69% ถึง 50.91% ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนพลังงานความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 27.94% ถึง 42.76% ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้เกิดพลังงานความร้อนสูญเสียที่ปล่องมีค่าเพิ่มขึ้น และพลังงานความร้อนสูญเสียที่เปลือกหุ้ม และพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการทอรีแฟคชั่นมีค่าลดลง สำหรับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุนมีค่าลดลงจาก 59.69% ถึง 50.91% เมื่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 300 °C ถึง 700 °C นอกจากนี้พบว่า อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 7.29 °C ต่อ นาที เป็น 21.35 °C ต่อ นาทีเมื่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 300 °C ถึง 700 °C การเพิ่มขึ้นของอัตราการให้ความร้อนเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่นำมาใช้ในการทอรีแฟคชั่นเฉลี่ย และอุณหภูมิไอเสียจากการเผาไหม้ที่มีค่าเพิ่มขึ้น

56406311 : Major (ENERGY ENGINEERING)

MR. Sran SUBSANTHITIKUL: THERMAL PERFORMANCE OF ROTARY DRUM TORREFACTION REACTOR Thesis advisor : Assistant Professor Nitipong Soponpongpipat, Ph.D.

The heating rate and energy balance of a small scale rotary drum torrefaction reactor were investigated. The steel rotary drum with a diameter of 0.35 m. and length of 0.80 m. was constructed. The shell was made from steel and had a diameter of 0.60 m. and length of 0.90 m. The ceramic fiber with a thickness of 0.05 m. was installed between the rotary drum and the inner surface of shell. Liquid Petroleum Gas (LPG) was used as heat source. The 4.0 sawdust of kg was loaded into the rotary drum for each experiment. The rotation speed of drum was controlled at 3.75 RPM. The flue gas temperature was set at 300, 500, and 700 °C. It was found that when the flue gas temperature was increased from 300 °C to 700 °C, the fraction of shell wall heat loss ( $Q_1$ ) and useful heat ( $Q_{\text{useful}}$ ) tended to decrease from 12.37% to 6.33% and 59.69% to 50.91%, respectively. In contrast, the fraction of stack heat loss ( $Q_2$ ) increased from 27.94% to 42.76%. The increase of flue gas temperature resulted in the increase of stack heat loss and the decrease of shell wall heat loss and also useful heat. The thermal efficiency of reactor slightly decreased from 59.69% to 50.91% when flue gas temperature was increased from 300 °C to 700 °C. The heating rate increased from 7.29 °C/min to 21.35 °C/min when the flue gas temperature was increased from 300 °C to 700 °C. The increase of heating rate resulted from the increase of average useful heat rate and flue gas temperature.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิติพงศ์ โสภณพงศ์พิพัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำตลอดจน ถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย รวมทั้งอาจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ธาราวดี และ อาจารย์ ดร. สุระ ตันติ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ ในการช่วยเหลือเกี่ยวกับงานด้านการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) สามารถดำเนินการวิจัย จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวที่คอยสนับสนุน ส่งเสริมและให้กำลังใจซึ่ง ช่วยเป็นพลังและแรงบันดาลใจให้ผู้วิจัยสามารถศึกษาและทำงานวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ที่ร่วมเรียนร่วมศึกษามาด้วยกัน ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจซึ่งกันและกันจนสามารถทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าหรือประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาแก่พระคุณบิดา มารดา ครูบาอาจารย์ ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาและอบรมสั่งสอน แนะนำ ให้การสนับสนุนและกำลังใจอย่างดียิ่งเสมอมา



ศรัณย์ ทรัพย์สัมฤทธิ์กุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	10
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	14
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	14
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	14
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.....	15
1.7 ความจำกัดของการวิจัย.....	15
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ชีวมวล.....	17
2.2 กระบวนการปรับสภาพชีวมวล.....	22
2.3 หลักการพื้นฐานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	25
2.4 ปฏิกริยาการเผาไหม้.....	25
2.5 สมดุลพลังงาน.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32



3.1 แผนการวิจัย .....	32
3.2 แผนการทดลอง .....	33
3.3 วิธีการทดลอง.....	33
3.4 วัตถุประสงค์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย .....	34
3.5 ระยะเวลาการวิจัย .....	36
3.6 สถานที่ทำการวิจัย .....	37
3.7 งบประมาณการวิจัย.....	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย .....	38
4.1 สมดุลพลังงานความร้อนของเตาทอรีแพคชั้นชนิดครีมหมูน.....	38
4.2 ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อง .....	43
4.3 ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ ..	45
4.4 ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแพคชั้น .	47
4.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแพคชั้นชนิดครีมหมูน .....	48
4.6 ผลของอุณหภูมิตอรีแพคชั้นที่มีต่ออัตราการให้ความร้อน.....	49
4.7 ผลของอุณหภูมิตอรีแพคชั้นที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ .....	51
4.8 ผลของอุณหภูมิตอรีแพคชั้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์.....	52
4.9 ผลของอุณหภูมิตอรีแพคชั้นที่มีต่อผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ .....	53
4.10 ผลของอุณหภูมิตอรีแพคชั้นที่มีต่อผลได้พลังงาน .....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	1
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	1
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	3
รายการอ้างอิง .....	4
ภาคผนวก.....	7
ประวัติผู้เขียน.....	39

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\dot{Q}_{cond}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน	w
$\dot{Q}_{conv}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน	w
$\dot{Q}_{rad}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน	w
$Q_f$	ค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง	MJ
$Q_{iqp}$	ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	MJ
$Q_{sf}$	ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนัง	MJ
$\dot{Q}_{st_i}$	อัตราพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียที่ วินาทีที่ i	MJ/s
$Q_{st}$	ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสีย	MJ
$M_{H_2O}$	น้ำหนักโมเลกุลของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 18.015	kg/kmol
$M_C$	น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 12.01	kg/kmol
$M_{H_2}$	น้ำหนักโมเลกุลของไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 2.016	kg/kmol
$M_{O_2}$	น้ำหนักโมเลกุลของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 31.999	kg/kmol
$M_{N_2}$	น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 28.013	kg/kmol
$M_{CO_2}$	น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 44.009	kg/kmol
$M_{CO}$	น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีค่าเท่ากับ 28.0098	kg/kmol
$\bar{C}_{p,H_2O}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ อ้างอิงจาก Table A.13	kJ/kmol
$\bar{C}_{p,CO_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อ้างอิงจาก Table A.13	kJ/kmol
$\bar{C}_{p,CO}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์อ้างอิงจาก Table A.13	kJ/kmol
$\bar{C}_{p,O_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน อ้างอิงจาก Table A.13	kJ/kmol
$\bar{C}_{p,N_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน อ้างอิงจาก Table A.13	kJ/kmol

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$CO$	โดยปริมาตรของไอเสีย	v/v%
$CO_2$	โดยปริมาตรของไอเสีย	v/v%
$\dot{m}_{H_2O, flue}$	อัตราการไหลของไอน้ำเมื่อเกิดการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{CO_2, flue}$	อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{CO, flue}$	อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{O_2, flue}$	อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{N_2, flue}$	อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้	kg/s
$m_f$	มวลเชื้อเพลิงที่ป้อน	kg
$LHV$	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว	MJ/kg
$k$	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)	w/m <sup>o</sup> C
$A$	พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน	m <sup>2</sup>
$dT$	ความแตกต่างของอุณหภูมิ	oC
$dx$	ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน	m
$h_c$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	W/m <sup>2</sup> oC
$h_{fg}$	ค่าความร้อนแฝงของน้ำที่ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 2,257.2	kJ/kg
$A_s$	พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับการไหล	m <sup>2</sup>
$Ra$	Rayleigh number	-
$g$	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 0.98	m/s <sup>2</sup>
$\beta$	volumetric thermal expansion coefficient $1/(T_s+T_\alpha)$	K <sup>-1</sup>
$L_c$	ความสูงของชุดให้ความร้อนแก่กระบวนการ	m
$Pr$	Prandtl number	-
$\nu$	kinematic viscosity	m <sup>2</sup> /s
$\epsilon$	ค่าการแผ่รังสี emissivity มีค่าเท่ากับ 0.77	-
$\sigma$	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$T_s$	อุณหภูมิไอเสียที่อุณหภูมิ	K
$T_{s,i}$	อุณหภูมิไอเสียที่อุณหภูมิ I	K
$T_\alpha$	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	K

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	ตัวแปรแทนคาร์บอนในเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว	kmol
B	ตัวแปรแทนไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว	kmol
G	ตัวแปรแทนก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการตรวจวัดในระบบ	v/v%
I	ตัวแปรแทนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการตรวจวัดในระบบ	v/v%
33,800	ตัวเลขนี้คือพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แล้วเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	kJ/kg
10,120	ตัวเลขนี้คือพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แล้วเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	kJ/kg
23,600	ตัวเลขนี้มาจากผลต่างของพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แล้วเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แทนที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	kJ/kg



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน พบว่าชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง อย่างไรก็ตาม ชีวมวลดิบนั้น หากนำมาใช้งานเลยยังพบว่ามีความชื้นสูง ค่าความร้อนต่ำ ความหนาแน่นต่ำ และย่อยสลายทางชีวภาพได้สูง กระบวนการทอรีแฟคชัน เป็นกระบวนการปรับสภาพทางเคมีความร้อนที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของชีวมวลดิบเหล่านั้น โดยกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นเป็นการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200 – 300 °C ภายใต้สภาวะบรรยากาศเฉื่อย [1] [2] [3]งานวิจัยครั้งแรกเกี่ยวกับกระบวนการทอรีแฟคชันเริ่มขึ้นที่ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1930 ถัดมาในปี ค.ศ. 1980 Bourgois และ Doat ได้นำเสนอผลงานเกี่ยวกับงานวิจัยทางด้านทอรีแฟคชัน ผลการทดลองของพวกเขาทำให้เกิดอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการทอรีแฟคชันในปี ค.ศ. 1987 [4]

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรีแฟคชันนั้นแบ่งออกเป็น 3 ระดับใหญ่ๆคือ ระดับห้องปฏิบัติการวิจัย ระดับนำร่องอุตสาหกรรม และระดับเชิงการค้า โดยความสามารถในการผลิตของการทอรีแฟคชันในระดับห้องปฏิบัติการวิจัยนั้น พบว่าน้อยกว่า 20 kg/hr ในขณะที่ความสามารถในการผลิตของกระบวนการทอรีแฟคชันในระดับนำร่องอุตสาหกรรม และระดับเชิงการค้า นั้นพบว่ามีค่าเท่ากับ 20-600 kg/hr และ 5-8 tons/hr ตามลำดับ นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันนั้นยังสามารถแบ่งตามประเภทได้ดังนี้ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ [5] [6] เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟ [7] [8] เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ [9] [10] เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน [11] เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู [7] [12] เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น [13] เครื่องปฏิกรณ์ระบบสายพานลำเลียงแบบสั้นได้ และเครื่องปฏิกรณ์แบบดรัมหมุน

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรีแฟคชันส่วนใหญ่เป็นแบบเคลื่อนที่ได้ โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์จึงค่อนข้างซับซ้อน และยากในการดำเนินการใช้งาน ดังนั้น เครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวจึงไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนที่ต้องการเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และง่ายต่อการใช้งาน เครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับจุดประสงค์ดังกล่าว จึงเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบดรัมหมุน อย่างไรก็ตาม การศึกษาสมมูลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์นี้มีความสำคัญอย่างมาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อสมมูลพลังงานของเตาทอรีแฟคชันแบบดรัมหมุนขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิห้องเผาไหม้และอัตราการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน

1.2.2 เพื่อศึกษาสมมูลพลังงานความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่มีต่อ ค่าความร้อน, ความหนาแน่น และผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อ ระยะเวลาให้ความร้อนของชีวมวล ก่อนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน ของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน

1.3.2 อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นมีผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล ได้แก่ ค่าความร้อน และความหนาแน่น

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง คือ ชี้เลื้อย ขนาดอนุภาคขนาด  $1386 \pm 65 \mu\text{m}$  และความชื้นเริ่มต้น  $8 \pm 1 \%$  มาตรฐานเปียก

1.4.2 ทำการทอรีไฟร์ชีวมวลที่อุณหภูมิ  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยแปรค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ 3 ค่า ได้แก่  $300, 500$  และ  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

1.4.3 แปรค่าอุณหภูมิทอรีไฟร์ 3 ค่า ได้แก่  $220, 250$  และ  $280 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ โดยกำหนดให้ระยะเวลาในการทอรีไฟร์เท่ากับ 45 นาที

1.4.4 กำหนดให้ความเร็วในการหมุนดรัมมีค่าคงที่ที่  $3.75 \text{ rpm}$

1.4.5 ใช้เตาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $35 \text{ cm}$  ยาว  $80 \text{ cm}$

1.4.6 ใช้ LPG เป็นแหล่งให้ความร้อน

## 1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาสมมูลพลังงานความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อน ของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน

1.5.2 ศึกษาระยะเวลาการให้ความร้อนก่อนถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน

1.5.3 ศึกษาสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวลทอรีไฟร์

1.5.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาที่มีผลต่อสมดุลพลังงานความร้อน, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, อัตราการให้ความร้อนค่าความหนาแน่น และผลได้เชิงมวล

1.5.5 สรุปผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ และเวลาที่มีผลต่อสมดุลพลังงานความร้อน, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, อัตราการให้ความร้อนค่าความหนาแน่น และผลได้เชิงมวลของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน พร้อมเขียนรายงานสรุปการวิจัย

## 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.6.1 การวิจัยนี้ใช้เตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 cm ยาว 80 cm เท่านั้น

1.6.2 การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุนเท่านั้น ในการศึกษาจะไม่ให้ความสำคัญกับการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาให้มีความสูงขึ้น

## 1.7 ความจำกัดของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเริ่มต้น เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในการออกแบบของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุนต่อไป การศึกษาในครั้งนี้จึงไม่ครอบคลุมตัวแปรต้นอื่นๆ ได้แก่อัตราเร็วในการหมุนดรัม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดรัมและความยาวของดรัม เป็นต้น

## 1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 ชีวมวลทอรีไฟร์ (Torried Biomass) หมายถึง ชี้เลื้อยที่ผ่านการทอรีไฟร์ด้วยกระบวนการทอรีแฟคชั่น

1.8.2 กระบวนการทอรีแฟคชั่น หมายถึง กระบวนการทางเคมีความร้อนที่ปรับสภาพชีวมวลให้อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 200 – 300 °C โดยผลิตภัณฑ์ ที่ได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็ง

1.8.3 สมดุลพลังงานหมายถึง พลังงานที่เข้ามาในระบบ และพลังงานที่เกิดในระบบ เท่ากับ พลังงานที่ออกจากระบบ รวมกับพลังงานที่สูญเสียในระบบ รวมกับพลังงานที่สะสมในระบบ

1.8.4 อุณหภูมิในห้องเผาไหม้หมายถึง อุณหภูมิของอากาศร้อนที่อยู่บริเวณรอบห้องเผาไหม้โดยได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนส่งไปยังห้องทอรีแฟคชั่น

1.8.5 ระยะเวลาในการให้ความร้อนหมายถึงเวลาที่ชีวมวลได้รับความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่กำหนดไว้

1.8.6 ค่าความร้อนหมายถึงพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงหนัก1กรัมมีหน่วยเป็นแคลอรีต่อกรัมหรือMJต่อกิโลกรัม

1.8.7 ผลได้เชิงมวล หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของมวลผลิตภัณฑ์ที่ทอรีไฟร์ได้เทียบกับ  
มวลเริ่มต้น





## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับหลักการพื้นฐานของกระบวนการทอรีแพคชั่น และประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแพคชั่นชนิดดรัมหมุน เพื่อแสดงให้เห็นถึง ขั้นตอนของทอรีแพคชั่น พร้อมทั้งความร้อนสูญเสียในระบบ และสมดุลพลังงานของระบบ โดยแบ่ง เนื้อหาออกเป็นส่วนหลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

- 2.1 ชีวมวล
- 2.2 กระบวนการปรับสภาพชีวมวล
- 2.3 หลักการพื้นฐานของกระบวนการทอรีแพคชั่น
- 2.4 ปฏิกริยาการเผาไหม้
- 2.5 สมดุลพลังงาน

#### 2.1 ชีวมวล

ชีวมวลคือ สารอินทรีย์ที่ได้มาจากธรรมชาติทั่วไป ที่สะสมพลังงานไว้ในตัวของมันเอง และสามารถนำ พลังงานเหล่านี้เก็บไว้มาใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างของสารอินทรีย์เหล่านี้เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด เศษ ใบไม้ กิ่งไม้ ของเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และธาตุอื่นๆ ซึ่งสามารถเผาไหม้ได้ จึงมีการนำชีวมวลมาเผาให้ความร้อนและก๊าซ จากชีวมวลมาใช้เป็นประโยชน์ต่อไป [14] ปริมาณของเสียชีวมวลนั้นรวมถึงของเสียและของเหลือใช้ ในการดำรงชีวิต บางส่วนของสารชีวมวลที่ถูกใช้ประโยชน์อื่นๆแล้ว ดังนั้นศักยภาพพลังงานของของ เสียชีวมวลบางส่วนของปริมาณที่ถูกเก็บทั้งหมดเท่านั้นที่พร้อมที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงาน อัตราส่วน ของความร้อนที่คิดค้น [15] แสดงดังตารางที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

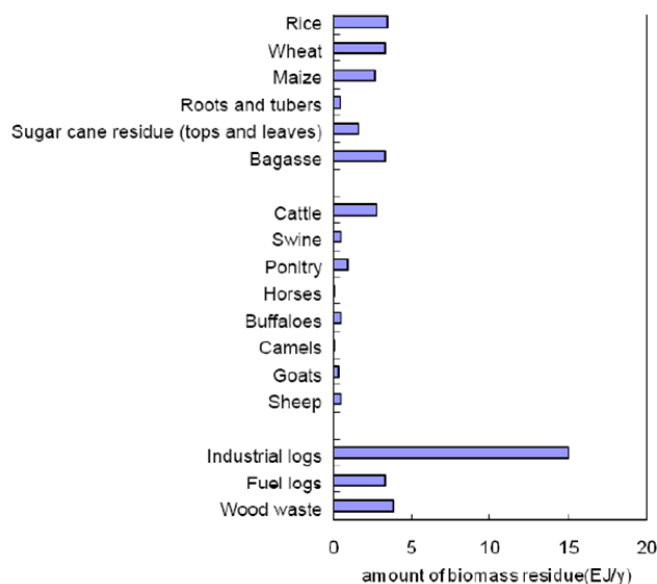
ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารชีวมวลและอัตราส่วนความร้อนใช้ของพลังงาน

	ชนิดสารชีวมวล	อัตราส่วนพลังงานพร้อมใช้ (%)
ของเสียทางการเกษตร	ข้าว ข้าวสาลี ข้าวโพด ราก และหัวใต้ ดินและเศษอ้อย	25
ของเสียปศุสัตว์	โค แกะ และ แพะ สุกร ม้า กระบือและ อูฐ ไก่	12.5
ของเสียป่าไม้	เศษไม้จากอุตสาหกรรม	75
	เศษไม้จากเชื้อเพลิง	25
	ไม้เหลือใช้	100

ศักยภาพพลังงานของของเสียชีวมวลประมาณได้จากการใช้อัตราส่วนความพร้อมใช้ที่แสดงในตารางที่ 2 ส่วนที่ใหญ่ที่สุดของศักยภาพพลังงานของของเสียชีวมวลซึ่งเป็นค่าต่อปีนั้นมาจากของเสียชีวมวลจากป่าไม้ ซึ่งประมาณ 22 เอกซะจูลของทั่วโลก โดยเฉพาะเศษไม้จากการตัดไม้และทำซุงมีค่าประมาณ 15 เอกซะจูล ซึ่งมีค่าประมาณสองในสามของของเสียชีวมวลจากป่าไม้ และมีค่ามากถึง 36% ของแหล่งกำเนิดสารชีวมวลทั้งหมด ของเสียชีวมวลจากการเกษตรนั้นมีค่าประมาณ 15 เอกซะจูลของทั่วโลก แต่ละสารชีวมวลมีค่าประมาณ 1.5 -3.5 เอกซะจูลโดยเฉลี่ย ในทางกลับกัน สารชีวมวลปศุสัตว์มีค่าประมาณ 5.4 เอกซะจูลของทั่วโลก ซึ่งมูลโคกระบือมีปริมาณมากที่สุดถึง 2.8 เอกซะจูลดังแสดงในรูปที่ 1[16]

### 2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลจะประกอบด้วย เซลลูโลส (พอลิเมอร์ประเภท glucosan), เฮมิเซลลูโลส (polyose), ลิกนิน (พอลิเมอร์เชิงซ้อนของ phenolic), สารอินทรีย์ (ash) และสารอินทรีย์[17] โดยสารอินทรีย์ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) และธาตุอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) เมื่อผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันองค์ประกอบเหล่านี้โดยส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นโปรตีนเซอร์ก้าซ และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดอันตราย เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ความพร้อมใช้ของสารชีวมวลเหลือใช้ในโลก

องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของชีวมวลเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์ ไปจนถึงการเลือกใช้ระบบเตรียมเชื้อเพลิง (Feed stock preparation system) และระบบ

ทำความสะอาดก๊าซ (Gas purification system) โดยองค์ประกอบของชีวมวลที่มีผลต่อการออกแบบ และการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันมีรายละเอียดดังนี้

### 2.2.1 ค่าพลังงานในชีวมวล (Energy content)

สารชีวมวลประกอบไปด้วยโมเลกุลของ คาร์บอน ไฮโดรเจน และธาตุต่างๆใน ปริมาณที่แตกต่างกันจึงทำให้ค่าพลังงานที่ได้มีความแตกต่างกันออกไปด้วย โดยค่าพลังงานที่นิยม นำมาใช้เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของสารชีวมวลที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงคือ ค่าความร้อน (Heating value)

ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงนั้นอยู่ใน สภาวะเริ่มต้นที่ 25 °C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมาที่ 25 °C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีสองค่าคือ ค่าความร้อนทางสูง (Higher Heating Value, HHV) หรือ gross Calorific Value (gross C.V) ซึ่งเกิดขึ้นกรณีที่ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์เกิดการเผาไหม้กลับตัว เป็นน้ำ และค่าความร้อนทางต่ำ (Lower Heating Value, LHV) หรือ net calorific value (net C.V) เกิดในกรณีที่ไอน้ำไม่กลับตัว ค่าความร้อนทางต่ำสามารถหาได้จากค่าความร้อนทางสูง โดยหัก ค่าความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำในสารผลิตภัณฑ์ออกจากค่าความร้อนทางสูง ดังนั้นจะได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง HHV และ LHV

#### - ค่าความร้อนต่ำ (LHV)

เป็นค่าการใช้พลังงานความร้อนต่อหน่วยชีวมวล โดยการนำชีวมวลน้ำหนัก 1 กิโลกรัม มาหาค่าความ ร้อน โดยหักลบค่าความร้อนในการกำจัดน้ำออกจากชีวมวล หรือชีวมวลมีความชื้นปกติ จากนั้นนำมา หาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวถือได้ว่าเป็นค่าที่นิยม นำมาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

#### - ค่าความร้อนสูง (HHV)

เป็นค่าการใช้พลังงานความร้อนต่อหน่วยชีวมวล โดยการนำชีวมวล 1 กิโลกรัม มากำจัดความชื้นหรือ กำจัดน้ำออก จากนั้นนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูง (HHV) โดยค่าความร้อนสูง มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 5.72(9\text{H} + \text{M}) \quad \text{kcal/kg} \quad (2.1)$$

หรือ

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 3.95(9\text{H} + \text{M}) \quad \text{kJ/kg} \quad (2.2)$$

เมื่อ H คือ ปริมาณร้อยละของไฮโดรเจนในชีวมวล และ

M คือ ปริมาณร้อยละความชื้นของชีวมวล

ค่าความร้อนสามารถคำนวณได้จากสูตรของดulong (Dulong) โดยใช้สัดส่วนโดยมวลของธาตุแต่ละธาตุ ดังนี้

$$\text{HHV} = 33.585C + 141.924H + 12.908S - 15.327O - 3.538O_2 \quad \text{kJ/kg} \quad (2.3)$$

นอกจากนี้ค่าความร้อนสามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM DIN51900 ซึ่งหาได้ 3 วิธี คือ จากการวิเคราะห์แบบ proximate, การวิเคราะห์แบบ ultimate และเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณความร้อน การวิเคราะห์โดยใช้ bomb calorimeter นั้นจะเป็นการวิเคราะห์ค่าความร้อนโดยตรง โดยมีออกซิเจนต่อเข้ากับเครื่อง bomb calorimeter การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่แท้จริง ได้ดังสมการ

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (2.4)$$

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

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $H_g$  คือ ค่าความร้อนรวมจากการเผาไหม้ (จูลต่อกรัม)  
 $W$  คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอริมิเตอร์ (แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)  
 $m$  คือ มวลของตัวอย่างเป็น (กรัม)  
 $e_1$  คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ (HNO<sub>3</sub>) 23.9 แคลอรี  
 $e_2$  คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 13.7 แคลอรี  
 $e_3$  คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด (2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้

Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)

### ค่ามาตรฐานคาลอริมิเตอร์

$$W = \frac{H_m + e_1 + e_3}{t} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $W$  คือ ค่าความจุความร้อนของบอมคาลอริมิเตอร์ ( แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)

$H$  คือ Heat of combustion of Standard benzoic acid

(ให้พลังงาน 6318 แคลอรีต่อกรัม)

$m$  คือ มวลของตัวอย่างเป็นกรัม

$t$  คือ ผลรวมของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( องศาเซลเซียส)

$e_1$  คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเกิดของ ( $\text{HNO}_3$ ) 23.9 แคลอรี

$e_3$  คือ ค่าแก้ไข สำหรับ ความร้อนในการเผาไหม้ลวด

(2.3 แคลอรี/เซนติเมตร เมื่อใช้ Parr 45C10 สายฟิวนิคเกิลโครม)

#### 2.1.2 ปริมาณความชื้น (Moisture Content, MC)

ความชื้นในชีวมวลคือ ปริมาณน้ำในวัตถุดิบ ถ้าสารชีวมวลมีความชื้นสูง (มากกว่าร้อยละ 30) จะทำให้ติดไฟได้ยาก และมีค่าพลังงานของโปรตีนเซอร์ก้าลดลง เนื่องจากในกระบวนการเผาไหม้ต้องใช้พลังงานความร้อนในการกำจัดน้ำออกจากชีวมวลจึงทำให้พลังงานที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปการแปรรูปสารชีวมวลด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีแก๊สซิฟิเคชันมักใช้สารชีวมวลที่มีความชื้นต่ำหรือแห้งเพื่อให้ได้โปรตีนเซอร์ก้าที่มีคุณภาพ

#### 2.1.3 ปริมาณเถ้าและองค์ประกอบของเถ้า (Ash content and composition)

เถ้าหรือเถ้า (Ash) เป็นสารอินทรีย์หรือแร่ธาตุที่ไม่สามารถเผาได้หมด ถ้าชีวมวลมีสัดส่วนปริมาณเถ้าสูง ก็จะส่งผลให้ค่าพลังงานของก๊าซเชื้อเพลิงน้อย และทำให้เตาแก๊สซิฟิเคชันต้องสำรองพื้นที่เก็บเถ้าเพิ่มขึ้นนอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าที่ต่างกันจะส่งผลต่อการหลอมตัวของเถ้าเป็นก้อนแข็งเรียกว่าเถ้า (Slag) ที่อาจเกิดการสะสมและอุดตันภายในเตาแก๊สซิฟิเคชัน ปัจจัยของการเกิดเถ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารประกอบออกไซด์ที่อยู่ในชีวมวล ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และออกไซด์ของอัลคาไลน์เช่น โซเดียมออกไซด์ ( $\text{NaO}$ ) และโพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) โดยทั่วไปเถ้าจากชีวมวลชนิดอื่นนอกเหนือจากไม้ จะมีองค์ประกอบของซิลิกาและอัลคาไลน์ในปริมาณสูงจนสามารถเกิดการหลอมตัวของเถ้าได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าระดับปกติจนกลายเป็นเถ้า [17]

### ข้อดีของชีวมวล

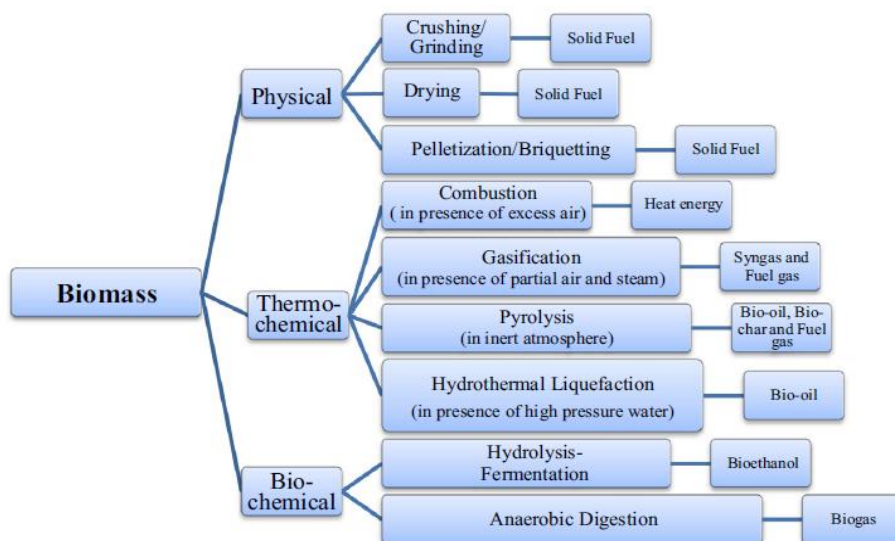
1. สามารถนำชีวมวลเหล่านี้มาทำปุ๋ย เช่นปุ๋ยหมัก
2. นำมาทำเชื้อเพลิง ให้ความร้อน หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า
3. ชีวมวลมีกำมะถันหรือซัลเฟอร์ต่ำไม่เกิน0.2% เมื่อนำชีวมวลมาเผาไหม้จะไม่สร้างปัญหาฝนกรด
4. การปล่อยใช้ชีวมวลย่อยสลายตามธรรมชาติทำให้เกิดก๊าซมีเทน(CH<sub>4</sub>)ซึ่งมีอันตรายมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO<sub>2</sub>)ถึง21เท่า
5. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลถูกหมุนเวียนกลับมาใช้โดยพืชเพื่อสังเคราะห์แสงไม่ก่อเกิดก๊าซเรือนกระจก
6. ช่วยลดปริมาณการนำเข้าเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น
7. เกิดการสร้างงานในชุมชนเกษตรกรรมรายได้เพิ่มขึ้น
8. ประหยัดเงินตราต่างประเทศ
9. ลดภาระในการกำจัด เช่นนำไปฝังกลบ หรือเผาทำลาย
10. ชีวมวลมีราคาถูกกว่าพลังงานพาณิชย์อื่น ต่อหน่วยความร้อนที่เท่ากัน

### ข้อเสียของชีวมวล

1. แหล่งผลิตชีวมวลอยู่กระจัดกระจาย ทำให้รวบรวมได้ยาก ค่าใช้จ่ายสูง
2. มีปริมาณไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับฤดูกาล และสภาพภูมิอากาศ
3. เกษตรกรเปลี่ยนชนิดของผลผลิตไปตามความต้องการของตลาด
4. ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูง ความหนาแน่นต่ำ ทำให้ขนส่งได้น้อย

## 2.2 กระบวนการปรับสภาพชีวมวล

กระบวนการปรับสภาพชีวมวลแบ่งออกได้เป็น 3 กระบวนการคือ กระบวนการทางกายภาพ, กระบวนการชีวเคมี และกระบวนการทางเคมีความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2 [18] [19] กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงทางเอ็นไซม์ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาล และนอกจากนี้กระบวนการหมักจะเปลี่ยนไปเป็น เอทานอลและแอลกอฮอล์ กระบวนการทางเคมีความร้อน เป็นการให้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ เช่นแก๊สสังเคราะห์และน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ตามลำดับ [14] [20] แก๊สสังเคราะห์ประกอบด้วย แก๊ส คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และแก๊สอื่นๆอีกเล็กน้อย เช่นมีเทน อีเทน เป็นต้น



รูปที่ 2.2 การปรับสภาพชีวมวล

โดยจะพบว่าการปรับสภาพชีวมวลแต่ละแบบนี้มีข้อดีข้อเสียดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดี ข้อเสียของการปรับสภาพชีวมวล

วิธีการปรับสภาพ	ข้อดี	ข้อจำกัด
1. ทางกายภาพ	เป็นการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด วัสดุดิบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของ วัสดุดิบ	ต้องใช้ร่วมกับกระบวนการปรับสภาพ อื่น ๆ
2. ทางกายภาพ ร่วมกับเคมี		
2.1 การระเบิดด้วย ไอน้ำ	ใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การ บด ด้วยเครื่องจักรอย่างเดียวน มีความ คุ่มค่าเมื่อ ใช้ในการปรับสภาพไม้เนื้อ แข็งและวัสดุ เหลือใช้ทางการเกษตร	มีประสิทธิภาพน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ทำลายส่วนประกอบของไซแลน (xylan) และก่อให้เกิดสารองค์ประกอบ ที่อาจไป ชัดขวางการทำงาน ของ จุลินทรีย์ที่ใช้ใน กระบวนการต่อไป

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดี ข้อเสียของการปรับสภาพชีวมวล (ต่อ)

วิธีการปรับสภาพ	ข้อดี	ข้อจำกัด
2.2 การระเบิดด้วย แอมโมเนีย	ช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล	มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้ในการปรับสภาพ ชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูง เช่น หนังกุ้งหอยเชลล์ และมีความชื้นสูง การระเบิดด้วยไอน้ำ
3. ทางเคมี		
3.1 การปรับสภาพด้วยโอโซน	มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน ไม่ผลิต สารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป และปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้ภายใต้ สภาวะอุณหภูมิและความดันห้อง	ต้องใช้โอโซนปริมาณมากในกระบวนการ ปรับสภาพทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง
3.2 การปรับสภาพด้วย กรด	สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลส ได้	มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี และจำเป็นต้องปรับ pH ให้เป็นกลาง ก่อนหลังจากปรับสภาพ เพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป
3.3 การปรับสภาพด้วย ต่าง	เป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมากเมื่อเทียบกับการปรับสภาพ ด้วยกรด และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพใน การย่อยสลายชีวมวล	จำเป็นต้องทำการปรับ pH ให้เป็นกลาง ก่อนหลังจากทำการปรับสภาพ เพื่อไม่ให้ ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป
3.4 การออกซิเดชัน	สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย ด้วยเอนไซม์ในขั้นต่อไปได้ และปฏิกิริยา สามารถดำเนินได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ และความดันห้อง	สารเคมีที่ใช้มีราคาสูง เช่น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
4. ทางชีวภาพ	ใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมีในกระบวนการ ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	อัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายและใช้ พื้นที่ในการผลิตมาก



โดยการปรับสภาพชีวมวลที่กำลังได้รับความสนใจนั้นได้แก่กระบวนการ ทอรีแฟคชัน ไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และคอมบัสชัน โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปถึงการทอรีแฟคชัน และจะกล่าวถึงรายละเอียดของกระบวนการในหัวข้อถัดไป

### 2.3 หลักการพื้นฐานของกระบวนการทอรีแฟคชัน

การทอรีแฟคชัน (Torrefaction) เป็นกระบวนการปรับปรุงชีวมวล ด้วยวิธีทางความร้อน โดยใช้ความร้อนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของ ลิกโนเซลลูโลสในชีวมวลให้มีคุณภาพสูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 °C โดยไม่มีออกซิเจน [17] ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนมากจะอยู่ในรูปของแข็ง มีความเปราะและมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้ของชีวมวลหลังจากปรับสภาพแล้วนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน [21] [22] เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนในชีวมวลถูกทำลาย นอกจากนี้ยังส่งผลให้ง่ายต่อการจัดเก็บและการขนส่งอีกด้วย [18] [23] การทอรีแฟคชัน แบ่งออกเป็นสองวิธีคือ ทอรีแฟคชันแบบแห้ง (Dry Torrefaction) และแบบเปียก (Wet Torrefaction) หรือ (Steam phase)

#### ทอรีแฟคชันแบบแห้ง

หมายถึง ชีวมวลถูกเตรียมในเฟสของแก๊สแบ่งออกได้เป็น นอนออกซิเดทีฟ ทอรีแฟคชัน และ ออกซิเดทีฟ ทอรีแฟคชัน

#### ทอรีแฟคชันแบบเปียก

หมายถึงชีวมวลถูกเตรียมในเฟสของของเหลว แบ่งออกเป็น ไดลูทแอซิส ทรีทเมนต์ และ สตีมเอ็กซ์โพลชัน

### 2.4 ปฏิกิริยาการเผาไหม้

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดปริมาณ ออกซิเจน และปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำมาคำนวณหาจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ โดยอาศัยสมการที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ พร้อมทั้งยังใช้ข้อมูล ultimate ของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่า ultimate ของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG)

เชื้อเพลิง	C	H	LHV (kJ/kg)
LPG	3.6	9.2	45,800.00

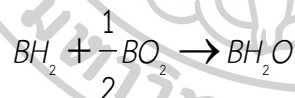
นำค่า ultimate ของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่ได้มาหา เปอร์เซ็นต์โดยมวล (%by mole) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG)

Element	wt%	Molecular weight	kmol/100 kg	%by mole
C	3.60	12.01	0.30	0.061635878
H <sub>2</sub>	9.20	2.016	4.56	0.938364122
Total	12.8		4.86	1

จากนั้นนำมาวิเคราะห์ kmol ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเผาไหม้ เริ่มจาก กำหนดให้เชื้อเพลิง ใน 1 kmol มีองค์ประกอบของธาตุ C, และ H<sub>2</sub>, ดังนี้ C = A kmol และ H<sub>2</sub> = B kmol เมื่อ Fraction ที่ตรวจวัดได้ในผลิตภัณฑ์ของปริมาณออกซิเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้ ; O<sub>2</sub> = G และ CO<sub>2</sub> = I

จากตารางที่ 2.4 จะยกตัวอย่างการวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซที่ได้หลังจากกระบวนการของการทดลองที่กำหนดให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้เท่ากับ 300 °C จะพบว่า kmol รวมของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG) จำนวน 0.56 กิโลกรัม สามารถหาได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์กับ จำนวน kmol รวมของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG) ต่อ 100 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 0.02723416 จากนั้นนำองค์ประกอบของธาตุที่มีในตัวเชื้อเพลิงอัดก้อนแบบเย็นเขียนสมดุลสมการเคมี เพื่อดูปริมาณของ kmol ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ดังสมการด้านล่าง



จำนวนโมล O<sub>2</sub> ที่ต้องการใช้ในปฏิกิริยาเคมี = 
$$\frac{k}{2} A + (1-k)A + \frac{1}{2} B + F$$

ดังนั้นต้องดูด O<sub>2</sub> จากอากาศ = 
$$\frac{k}{2} A + (1-k)A + \frac{1}{2} B$$

จะได้ว่า จะมี N<sub>2</sub> ติดมากับอากาศ = 
$$3.76 \left[ \frac{k}{2} A + (1-k)A + \frac{1}{2} B \right]$$

วิเคราะห์จำนวน kmol ของผลิตภัณฑ์ได้ดังต่อไปนี้

$$N_2 = 3.76 \left[ \frac{k}{2} A + (1-k)A + \frac{1}{2} B \right] \quad (2.7)$$

$$O_2 = \beta \quad (2.8)$$

$$CO = kA \quad (2.9)$$

$$CO_2 = (1 - k)A \quad (2.10)$$

$$H_2O = B \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวน } kmol \text{ รวม} &= 3.76 \left[ \frac{k}{2} A + (1 - k)A + \frac{1}{2} B \right] + \beta + kA + (1 - k)A + A + B \\ &= 1.88kA + 3.76A - 3.76kA + 1.88B + \beta + kA + A - kA + B \\ &= (-1.88kA + 4.76)A + 2.88B + \beta \end{aligned} \quad (2.12)$$

Fraction  $O_2$  ในผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} G &= \beta / [-1.88kA + 4.76A + 2.88B + \beta] \\ \beta &= G[-1.88kA + 4.76A + 2.88B + \beta] \\ \beta &= \frac{G[-1.88kA + 4.76A + 2.88B]}{1 - G} \end{aligned} \quad (2.13)$$

และ

$$\begin{aligned} I &= (0 - k)A / [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B + \beta] \\ (I - k)A &= I[-1.88kA + 4.76A + 2.88B + \beta] \\ A - kA &= -1.88kAI + 4.76AI + I[2.88B + \beta] \\ [1.88AI - A]k &= [I - 1]A + I[2.88B + \beta] \\ k &= \frac{[4.76 - 1]A + I[2.88B + \beta]}{[-1.88AI - A]} \end{aligned} \quad (2.14)$$

จำนวน kmol ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากทำการเผาไหม้ต่อ 1 kmol ของเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้เท่ากับ 300 °C ได้จากสมการที่ 2.7 - 2.11 โดยใช้สมการที่ 2.12 - 2.14 ในการคำนวณ แสดงผลดังตารางผนวก ข.2

## 2.5 สมดุลพลังงาน

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเครื่องปฏิกรณ์ที่เข้าและออกจากระบบ ปริมาตรควบคุมนี้จะพิจารณาเทียบกับสภาวะอากาศแวดล้อม และพิจารณาสมดุลพลังงานเมื่อเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะคงตัวภายใต้สมมติฐาน ดังต่อไปนี้

1. ระบบ isochoric process คือเป็นปริมาตรควบคุมที่ และพิจารณาอยู่ในสภาวะคงตัว
2. พิจารณาระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์มีสภาวะการทำงานแบบปกติหรือมีสภาวะสมดุลพลังงานความร้อน (Thermal equation) ซึ่งความร้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จะกลายเป็นความร้อนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมด โดยไม่มีการสะสมอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์

3. พิจารณาระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งถือว่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ยที่คงที่และอุณหภูมิเดียวกันทั้งระบบ รวมทั้งอัตราของมวลไหลข้ามผิวควบคุม อัตราการถ่ายเทความร้อน และพลังงานผิวควบคุมนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

4. องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงรวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง เช่น ค่าความร้อน ความหนาแน่น มีค่าคงที่

5. เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้คือ เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG)

6. การพิจารณาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (LHV) ในการคำนวณ

7. กำหนดค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิงวัตถุดิบที่ใช้ และก๊าซมีค่าคงที่ตลอดกา

พิจารณา

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม จำเป็นต้องพิจารณากฎการอนุรักษ์พลังงานควบคู่กัน ดังต่อไปนี้

2.5.1 สมดุลมวลของเครื่องปฏิกรณ์

การพิจารณาปริมาตรควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลกับสิ่งแวดล้อม จะสามารถนิยามกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) ดังสมการ  
[มวลไหลเข้าปริมาตรควบคุมทั้งหมด] – [มวลไหลออกจากปริมาตรควบคุมทั้งหมด] = [การเปลี่ยนแปลงของมวลสุทธิภายในปริมาตรควบคุม]

2.5.1.1 พลังงานความร้อนขาเข้า

2.5.1.1.1 พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง

พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG) สามารถคำนวณได้จากผลคูณของมวลของเชื้อเพลิง กับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ใช้ [24] ดังแสดงในสมการที่ 2.12 รายการคำนวณอย่างละเอียดนั้นแสดงใน ภาคผนวก ข.

$$Q_f = m_f \times LHV \quad (2.12)$$

เมื่อ  $m_f$  คือ มวลเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่ใช้, kg

$LHV$  คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง, kJ/kg

$Q_f$  คือ ค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง, MJ

2.5.1.2 พลังงานความร้อนขาออก

2.5.1.2.1 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่

สมบูรณ์การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดจากการเผาไหม้แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เกิดขึ้นแทนที่การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้คาร์บอน 1 กิโลกรัมของเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะมีค่าเท่ากับ 33,800 kJ/kg แต่

หากในการเผาไหม้นั้นไม่สมบูรณ์จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์แทนที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 10,120 kJ/kg ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เกิดการสูญเสียไปกับการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์นี้จึงมีค่าเท่ากับ 23,680 kJ/kg [25] [26] ดังนั้นเพื่อตรวจสอบว่ามีพลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในทดลองนั้น จึงได้ทำการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน ด้วยเครื่อง Fyrite Gas Analyzers พบว่ามีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน เท่ากับ 14.33 และ 4.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับดังที่แสดงในตารางผนวก ข.1 และนำค่าที่ได้จากการทดสอบนี้มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าการวิเคราะห์ ultimate ของเชื้อเพลิง ดังแสดงในสมการที่ 2.13 รายการคำนวณอย่างละเอียดนั้นแสดงใน ภาคผนวก ข.

$$Q_{kp} = \frac{CO \times C_r}{CO_2 + CO} \times 23,680 \text{ kJ / kg} \quad (2.13)$$

เมื่อ,  $CO_2$  คือ % โดยปริมาตรของไอเสีย

$C_r$  คือ สัดส่วนของคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg

$Q_{kp}$  คือ ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, MJ

2.5.1.2.2 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนัง การสูญเสียความร้อนที่ผิวผนังของระบบนั้นมี 2 รูปแบบคือ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน และการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 2.14 รายการคำนวณอย่างละเอียดนั้นแสดงใน ภาคผนวก ข.

$$Q_{sf} = \sum_{i=1}^n h A_s (T_{s,i} - T_\alpha) + \sum_{i=1}^n \epsilon A_s \sigma (T_{s,i}^4 - T_\alpha^4) \quad (2.14)$$

เมื่อ  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$A_s$  คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับการไหล,  $m^2$

$T_{s,i}$  คือ อุณหภูมิไอเสียที่อุณหภูมิ  $i$ , K

$T_\alpha$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, K

$\epsilon$  คือ ค่าการแผ่รังสี emissivity มีค่าเท่ากับ 0.77

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$

$Q_{sf}$  คือ ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนัง, MJ

2.5.1.2.3 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียนั้น สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบไอเสีย เมื่อทราบว่าก๊าซไอเสียที่ไหลออกมาทางปากปล่องนั้นประกอบด้วย ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้สมการที่ 2.15 รายการคำนวณอย่างละเอียดนั้นแสดงใน ภาคผนวก ข.

$$\begin{aligned}
 Q_{st} = & \frac{\dot{m}_{H_2O, flue}}{M_{H_2O}} \int_{T_\alpha}^{T_v} \bar{c}_{p, H_2O} dT + \frac{\dot{m}_{CO_2, flue}}{M_{CO_2}} \int_{T_\alpha}^{T_v} \bar{c}_{p, CO_2} dT \\
 & + \frac{\dot{m}_{CO, flue}}{M_{CO}} \int_{T_\alpha}^{T_v} \bar{c}_{p, CO} dT + \frac{\dot{m}_{O_2, flue}}{M_{O_2}} \int_{T_\alpha}^{T_v} \bar{c}_{p, O_2} dT \\
 & + \frac{\dot{m}_{N_2, flue}}{M_{N_2}} \int_{T_\alpha}^{T_v} \bar{c}_{p, N_2} dT
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

- เมื่อ  $\dot{m}_{H_2O, flue}$  คือ อัตราการไหลของไอน้ำเมื่อเกิดการเผาไหม้, kg/s
- $M_{H_2O}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 18.015 kg/kmol
- $\bar{c}_{p, H_2O}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ อ้างอิงจาก Table A.13[27]
- $\dot{m}_{CO_2, flue}$  คือ อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้, kg/s
- $M_{CO_2}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 44.00 kg/kmol
- $\bar{c}_{p, CO_2}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อ้างอิงจาก Table A.13 [27]
- $\dot{m}_{CO, flue}$  คือ อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้, kg/s
- $M_{CO}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มีค่าเท่ากับ 28.0098 kg/kmol
- $\bar{c}_{p, CO}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์อ้างอิงจาก Table A.13 [27]
- $\dot{m}_{O_2, flue}$  คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้, kg/s
- $M_{O_2}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 31.999 kg/kmol
- $\bar{c}_{p, O_2}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน อ้างอิงจาก Table A.13 [27]
- $\dot{m}_{N_2, flue}$  คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้, kg/s
- $M_{N_2}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 kg/kmol
- $\bar{c}_{p, N_2}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน อ้างอิงจาก Table A.13
- $Q_{st}$  คือ ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสีย, MJ [27]

#### 2.5.1.2.4 พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแพคชั่น

ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชันหาได้จากค่าพลังงานความร้อนค่าเข้าลบด้วยพลังงานความร้อนที่สูญเสีย ดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$Q_{uf} = Q_f - (Q_{icp} + Q_{st} + Q_{sf}) \quad (2.16)$$

- เมื่อ  $Q_{uf}$  คือ ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน, MJ  
 $Q_f$  คือ ค่าความร้อนจากเชื้อเพลิง, MJ  
 $Q_{icp}$  คือ ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, MJ  
 $Q_{st}$  คือ ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสีย, MJ  
 $Q_{sf}$  คือ ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนัง, MJ



### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “ประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน” มีรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย ดังนี้

- 3.1 แผนการวิจัย
- 3.2 แผนการทดลอง
- 3.3 วิธีการทดลอง
- 3.4 วัตถุประสงค์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย
- 3.5 ระยะเวลาการทดลอง
- 3.6 สถานที่ทำการทดลอง
- 3.7 งบประมาณการวิจัย

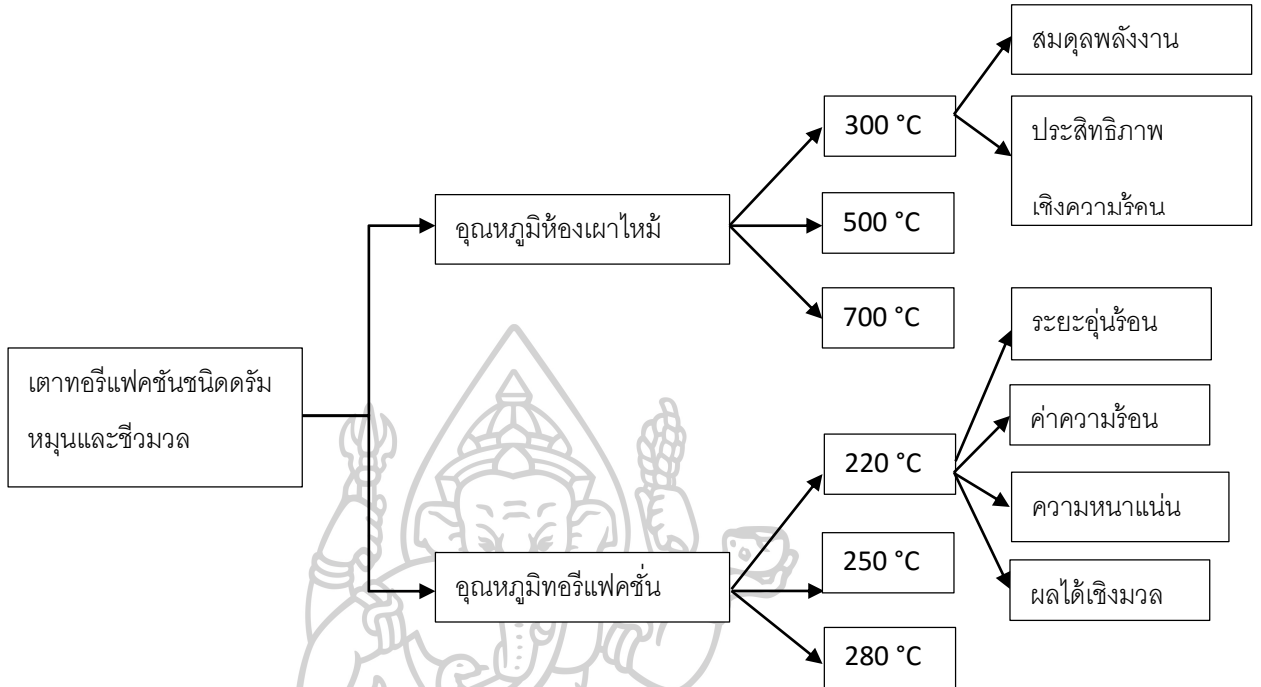
#### 3.1 แผนการวิจัย



รูปที่ 3.1 แสดงแผนการวิจัยประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน



### 3.2 แผนการทดลอง



รูปที่ 3.2 แสดงแผนการทดลองประสิทธิภาพเชิงสมรรถนะทางความร้อนของเตาทอรีแพคชั่นชนิดดรัมหมุน

### 3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 เตรียมซีวมวล เริ่มจากจัดหาซีลื้อนำมาตากแดดลดความชื้นประมาณ 2 วันๆ ละ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบรรจุถุงปิดสนิท เก็บในที่ร่ม ซีลื้อที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด  $1386 \pm 65$  ไมโครเมตร ความชื้นเริ่มต้น  $8 \pm 1$  % มาตรฐานเปียก จำนวน 4 กิโลกรัมต่อการทดลอง 1 ครั้ง

3.3.2 บรรจุซีวมวล โดยนำซีวมวลที่เตรียมไว้สำหรับการทดลองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบวางบนพื้นให้ได้น้ำหนัก 4 กิโลกรัม จากนั้นนำซีวมวลที่ชั่งแล้วใส่ในเตาปฏิกรณ์ จากนั้นทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ดังรูปที่ 3. และต่อปลายสายวัดอุณหภูมิกับเครื่องดาต้าล็อกเกอร์ และปิดฝาเตาปฏิกรณ์ชั้นในและชั้นนอกให้แน่น

3.3.3 เริ่มการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ และการศึกษาผลของอุณหภูมิการทอรีแพคชั่น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.3.1 ในการศึกษาผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ เริ่มจากนำถังแก๊สปิโตเลียมเหลวต่อเข้ากับหัวเผาโดยใช้สายแก๊สเชื่อมต่อนั้นจุดไฟแล้วเปิดสวิทหมუნเตา จากนั้นรอให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนดคือ 300 500 และ 700 °C เมื่ออุณหภูมิภายในรีแอกเตอร์ หรือ

อุณหภูมิการทอรีแฟคชั่นมีค่าเท่ากับ 300 °C จึงทำการปิดวาล์วแก๊ส และมอเตอร์แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จึงนำชีวมวลทอรีไฟร์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก

3.3.3.2 ในการศึกษาอุณหภูมิการทอรีแฟคชั่น เริ่มจากนำถังแก๊สปิโตเลียมเหลวต่อเข้ากับหัวเผาโดยใช้สายแก๊สเชื่อมต่อจากนั้นจุดไฟแล้วเปิดสวิทช์หมุนเตา ควบคุมอุณหภูมิห้องเผาไหม้ให้อยู่ที่ 500 °C จากนั้นรอให้อุณหภูมิการทอรีแฟคชั่นถึงอุณหภูมิที่กำหนดคือ 220 250 และ 280 °C เมื่อได้อุณหภูมิที่กำหนดไว้ ให้คงที่ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลา 45 นาที จึงทำการปิดวาล์วแก๊ส และมอเตอร์แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จึงนำชีวมวลทอรีไฟร์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก

### 3.3.4 การบันทึกค่า มีดังนี้

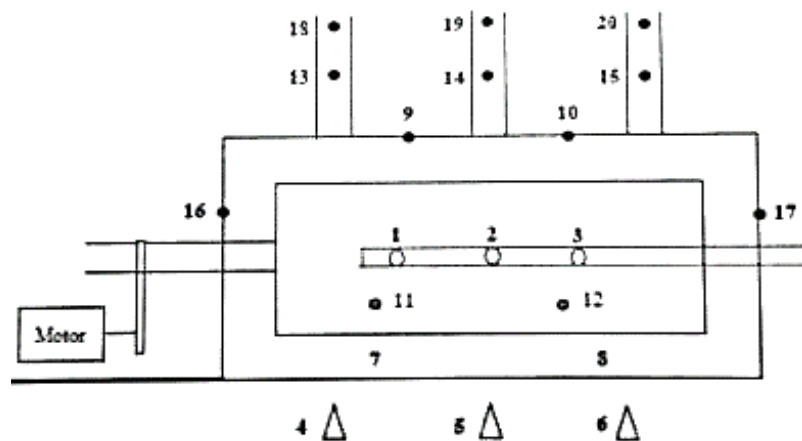
3.3.4.1 บันทึกน้ำหนักของซีลี้อยาก่อนและหลังการทดลอง

3.3.4.2 บันทึกน้ำหนักของแก๊สปิโตเลียมเหลวก่อนและหลังการทดลอง

3.3.4.3 บันทึกอุณหภูมิตามจุดต่างๆที่ได้ติดตั้งไว้แล้วทุกๆ 1 วินาที

3.3.4.4 บันทึกปริมาณออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไอเสีย โดยเฉลี่ย 6 ครั้ง

ตลอดระยะเวลาการทดลองนำผลการทดลองบันทึกในแบบฟอร์มบันทึกการทดลอง



รูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดการติดตั้งสายดาด้าล็อกเกอร์

## 3.4 วัตถุประสงค์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้วัตถุประสงค์และเครื่องมือสำหรับการวิจัย ดังนี้

3.4.1 วัตถุประสงค์ คือ ซีลี้อย

3.4.2 เครื่องมือสำหรับการวิจัย

3.4.2.1 เตาทอรีไฟร์ชนิดดรัมหมุน



รูปที่ 3.4 เตาทอริไฟร์ชนิดดรัมหมุน

3.4.2.2 ดาต้าล็อกเกอร์และสายวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 ดาต้าล็อกเกอร์และสายวัดอุณหภูมิ

3.4.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบตั้งพื้นช่วงการวัด 0-150 กิโลกรัม



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบตั้งพื้นช่วงการวัด 0-150 กิโลกรัม

#### 3.4.2.4 ถังแก๊สปิโตเลียมเหลวพร้อมวาล์วปรับแรงดัน



รูปที่ 3.7 ถังแก๊สปิโตเลียมเหลวพร้อมวาล์วปรับแรงดัน

### 3.5 ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มการทดลองเก็บข้อมูลสำหรับการวิจัยตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2558 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2560 และการสรุปผลการทดลองพร้อมเขียนรายงานการวิจัยแล้วเสร็จภายในเดือนมิถุนายน 2560 ซึ่งการดำเนินการตลอดระยะเวลาการวิจัยสามารถเขียนเป็นตารางสรุปได้ดังนี้

### ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย

รายการการดำเนินการวิจัย	ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเพื่อหาเงื่อนไขและหลักการ ทำงานของเตาปฏิกรณ์ทอริไฟร์ชนิดดรัมหมุน	ส.ค. – ก.ย. 2558
2. ศึกษาผลและรวบรวมข้อมูลของอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่มี ผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน และสมดุลพลังงาน	ต.ค. 2558– เม.ย. 2560
3. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มี ต่ออัตราการให้ความร้อนของกระบวนการทอริแฟคชัน	ต.ค. 2558– เม.ย. 2560
4. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อ ระยะเวลาให้ความร้อนของชีวมวลก่อนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้	ต.ค. 2558– เม.ย. 2560
5. สรุปผลการวิเคราะห์และเขียนรายงานสรุปการวิจัย	พ.ค. – มิ.ย. 2560

### 3.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

### 3.7 งบประมาณการวิจัย

สำหรับการวิจัยนี้จะใช้งบประมาณเพื่อดำเนินการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนเงิน  
โดยประมาณ 52,000 บาท (ห้าหมื่นสองพันบาทถ้วน) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 ค่าเชื้อเพลิง จำนวนเงินที่ใช้ 2,000 บาท

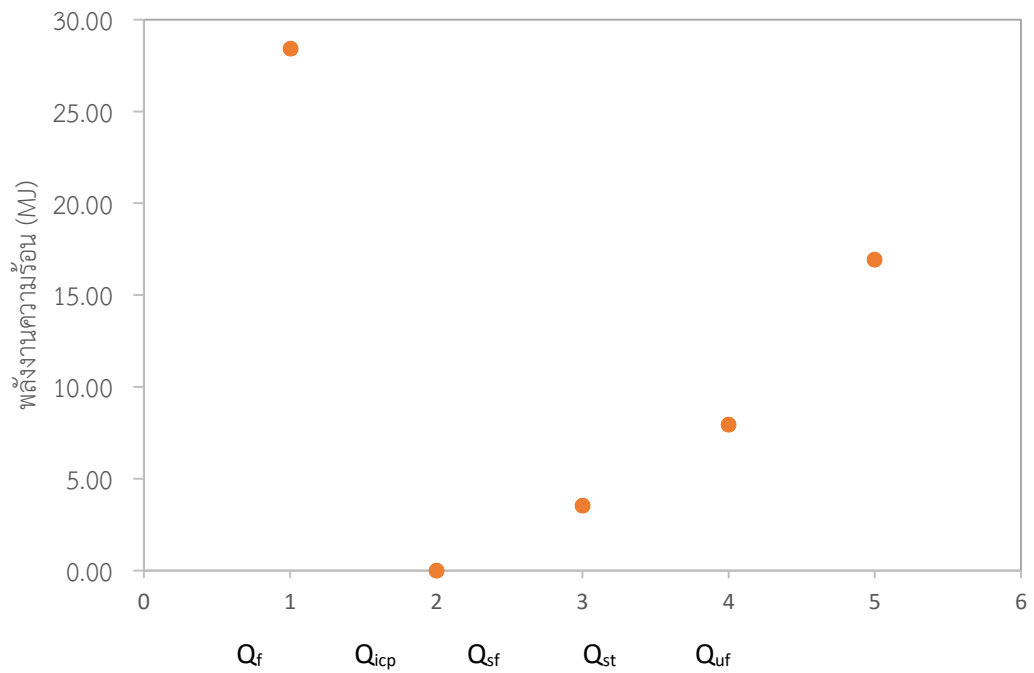
3.4.2 ค่าการดำเนินการและอุปกรณ์ จำนวนเงินที่ใช้ 50,000 บาท

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

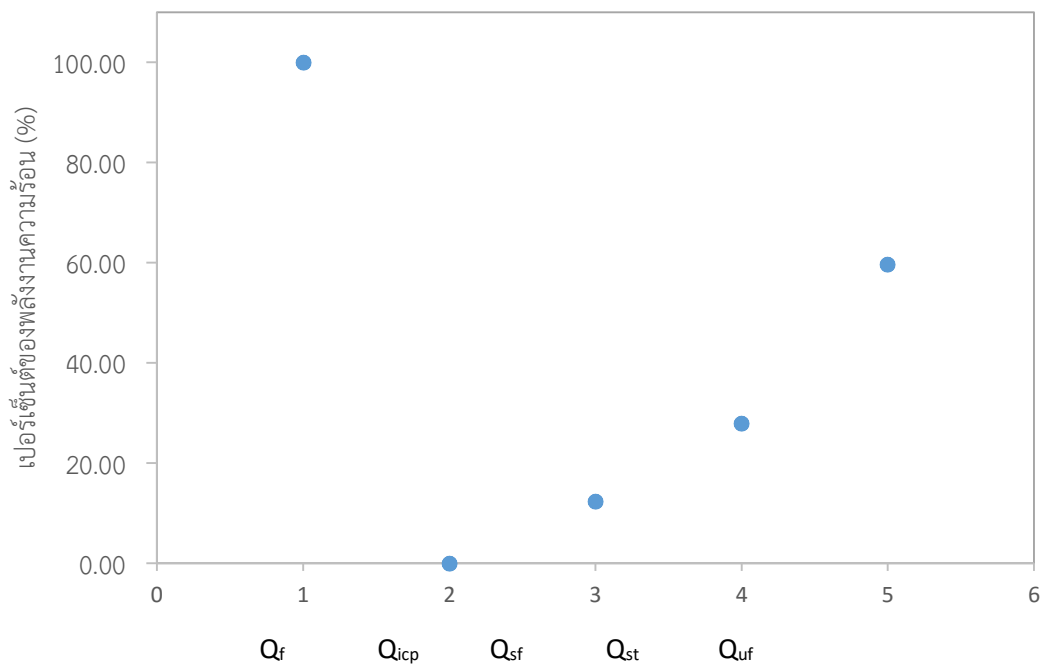
### 4.1 สมดุลพลังงานความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน

รูปที่ 4.1 -4.3 ก และ รูปที่ 4.1 -4.3 ข แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อน และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300, 500 และ 700 °C แกนตั้งของรูปที่ 4.1 -4.3 ก แสดงพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็นเมกะจูล แกนตั้งของรูปที่ 4.1 -4.3 ข แสดงเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ แกนนอนทั้งสองแสดงชนิดของพลังงานความร้อนในระบบของงานวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ พลังงานความร้อนขาเข้า ซึ่งได้รับพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว (Qf) และพลังงานความร้อนขาออก อันได้แก่ พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Qicp) พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อย (Qst) พลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ (Qsf) และ พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส (Quf)

เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนสูญเสียโดยภาพรวมที่เกิดขึ้นในระบบ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300, 500 และ 700 °C พบว่า ความร้อนเกิดการสูญเสียให้กับ พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อย (Qst) มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 7.93, 9.64 และ 12.73 MJ คิดเป็น 27.94, 37.59 และ 42.76 % ตามลำดับ รองลงมาคือ พลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ (Qsf) มีค่าเท่ากับ 3.51, 2.60 และ 1.88 MJ คิดเป็น 12.37, 10.12 และ 6.33 % ตามลำดับ และไม่มีค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Qicp) เนื่องจากตรวจไม่พบปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในแต่ละการทดลอง

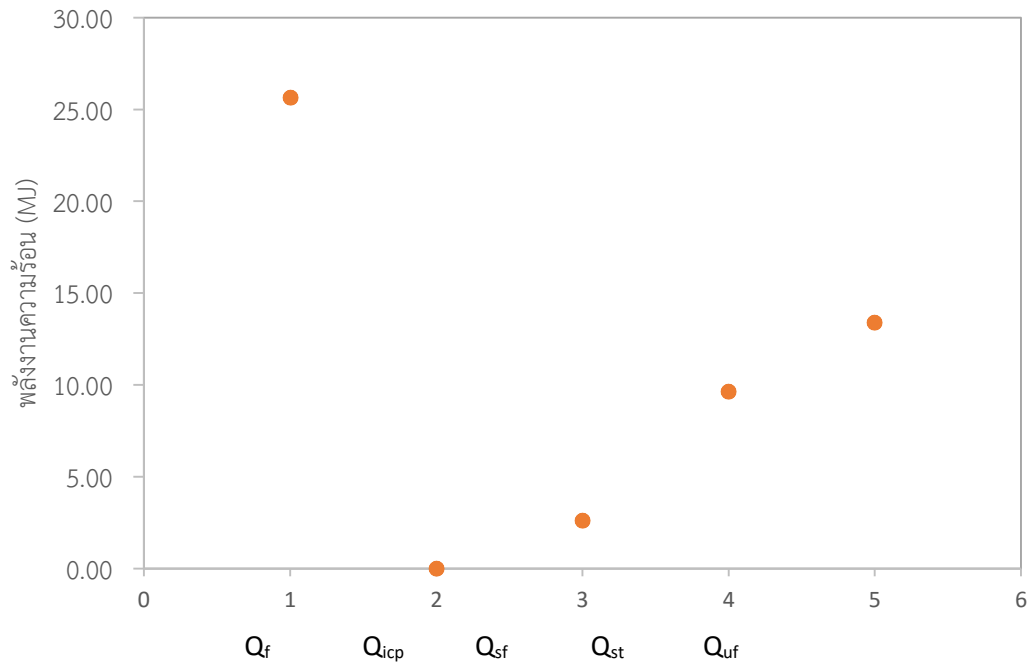


4.1 (ก) พลังงานความร้อน (MJ)

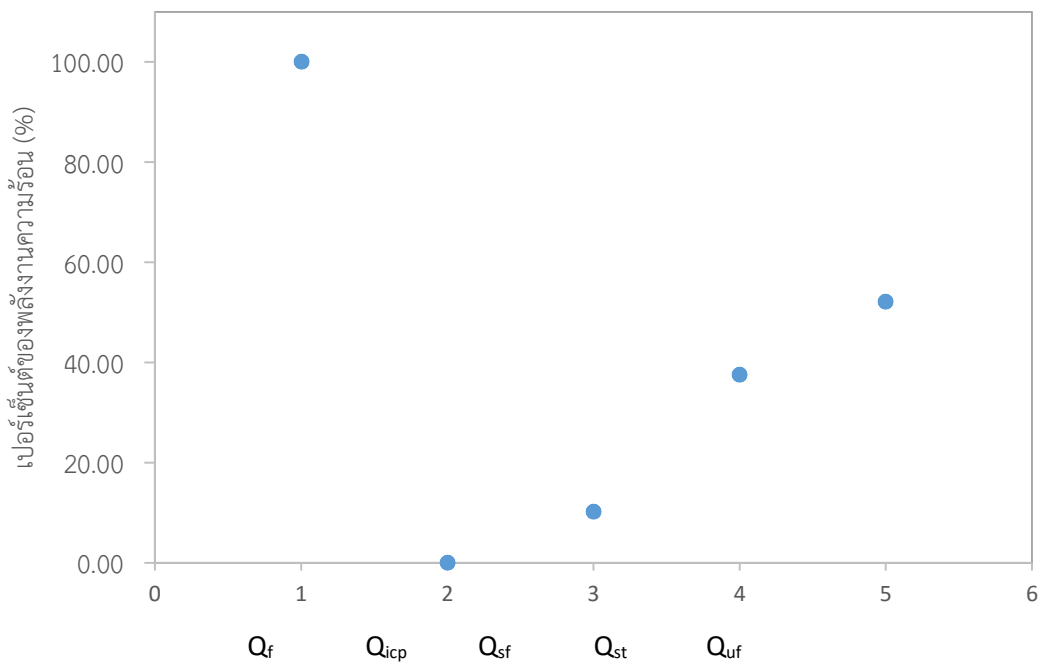


4.1 (ข) เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อน (%)

รูปที่ 4.1 แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อน และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C



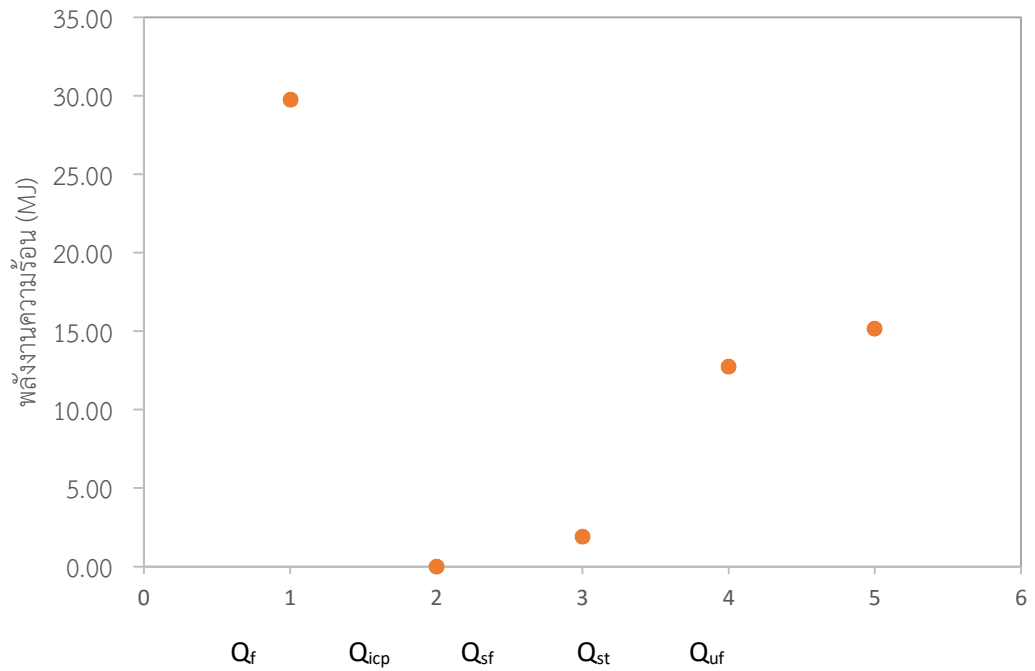
4.2 (ก) พลังงานความร้อน (MJ)



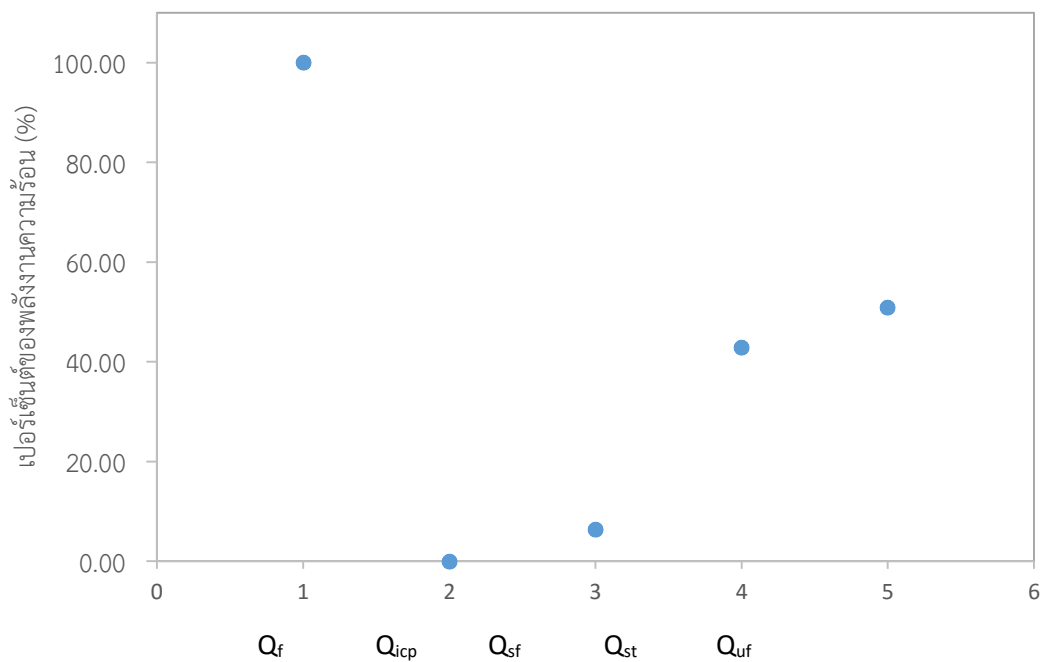
4.2 (ข) เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อน (%)

รูปที่ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อน และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 500 °C





4.3 (ก) พลังงานความร้อน (MJ)



4.3 (ข) เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อน (%)

รูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อน และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 700 °C

สำหรับรายละเอียดพลังงานความร้อนสูญเสียแต่ละชนิด และสัดส่วนพลังงานความร้อนสูญเสียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางจะเห็นว่า พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นของระบบ อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300, 500 และ 700 °C ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนมีค่าเท่ากับ 16.95, 13.41 และ 15.16 MJ คิดเป็น 59.69, 52.29 และ 50.91 % ตามลำดับ

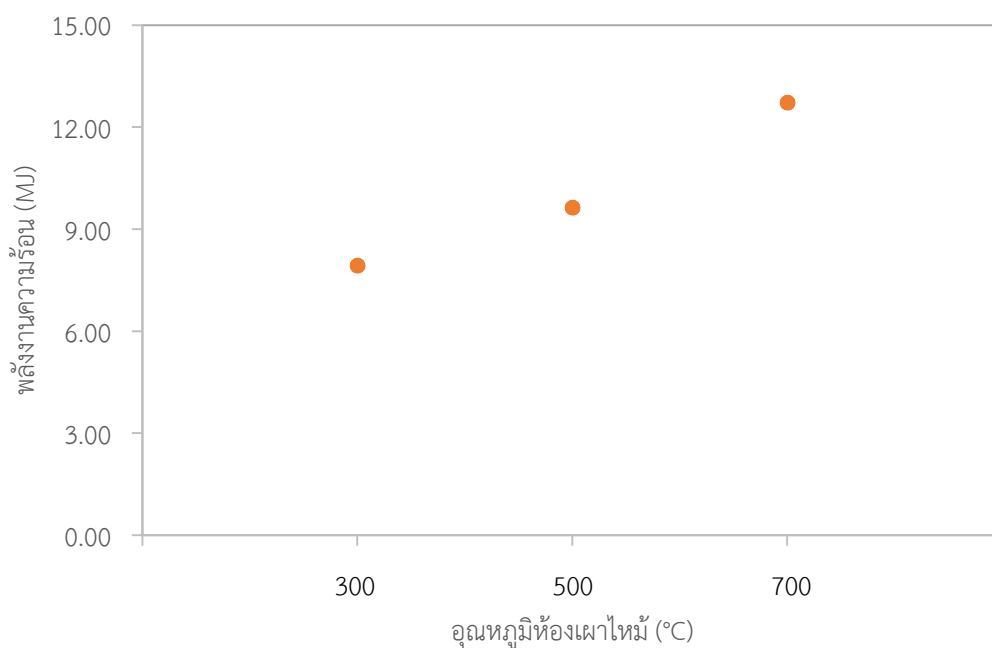
จึงสามารถสรุปได้ว่า ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ สูญเสียไปกับพลังงานความสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อย และพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 4.1 พลังงานความร้อน และสัดส่วนพลังงานความร้อนของระบบ

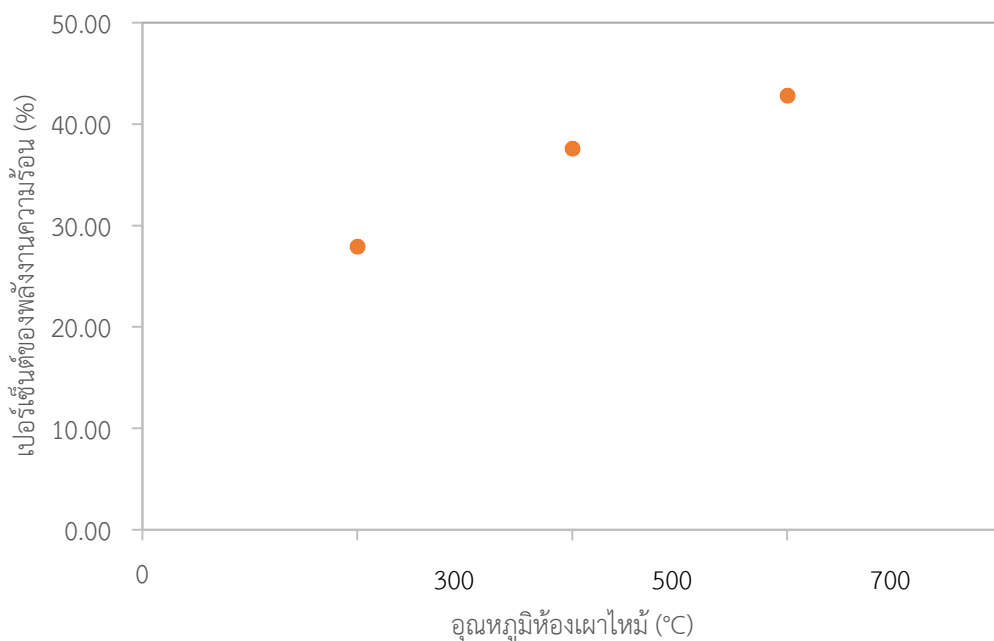
พารามิเตอร์	อุณหภูมิห้องเผาไหม้		
	300 (°C)	500 (°C)	700 (°C)
พลังงานความร้อนจากปิโตรเลียมเหลว, MJ	28.40	25.65	29.77
เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนจากปิโตรเลียมเหลว, %	100.00	100.00	100.00
พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, MJ	0.00	0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, %	0.00	0.00	0.00
พลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ, MJ	3.51	2.60	1.88
เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ, %	12.37	10.12	6.33
พลังงานความสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อย, MJ	7.93	9.64	12.73
เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อย, %	27.94	37.59	42.76
พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น, MJ	16.95	13.41	15.16
เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น, %	59.69	52.29	50.91
ประสิทธิภาพของระบบ, %	59.69	52.29	50.91

## 4.2 ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อความร้อนสูญเสียเนื่องจากการไอเสียที่ปล่อง

รูปที่ 4.4 ก และ ข แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการไอเสียที่ปล่อง ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ แกนตั้งของรูปที่ 4.4 ก แสดงพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็น MJ แกนตั้งของรูปที่ 4.4 ข แสดงพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ แกนนอนของรูปทั้งสองแสดงอุณหภูมิห้องเผาไหม้ มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการไอเสียที่ปล่องเพิ่มขึ้น เท่ากับ 7.93, 9.64 และ 12.73 MJ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการไอเสียที่ปล่อง พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น คิดเป็น 27.94, 37.59 และ 42.59 % ตามลำดับ ผลที่ได้นี้สามารถอธิบายได้จากความจริงที่ว่าปริมาณก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซไอเสียทำให้ความเร็วและอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดความร้อนจำนวนมากไหลผ่านทางปล่องโดยก๊าซไอเสียเป็นตัวพาความร้อนเหล่านั้นออกไป



4.4 (ก) พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการไอเสียที่ปล่อง (MJ)



#### 4.4 (ข) พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อง (%)

รูปที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่องที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ

ดังนั้นการพิจารณาค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่องนั้น จะพิจารณาจากปริมาณก๊าซในไอเสีย ซึ่งจะประกอบด้วย ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ), ก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C ส่งผลให้ปริมาณอัตราการไหลขององค์ประกอบก๊าซรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.013, 0.020 และ 0.038 kg/s ตามลำดับ เมื่อดูที่เปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนสูญเสียในส่วนนี้จะพบว่าค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่องนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ ซึ่งจะกล่าวรวมกันในหัวข้อที่ 4.3

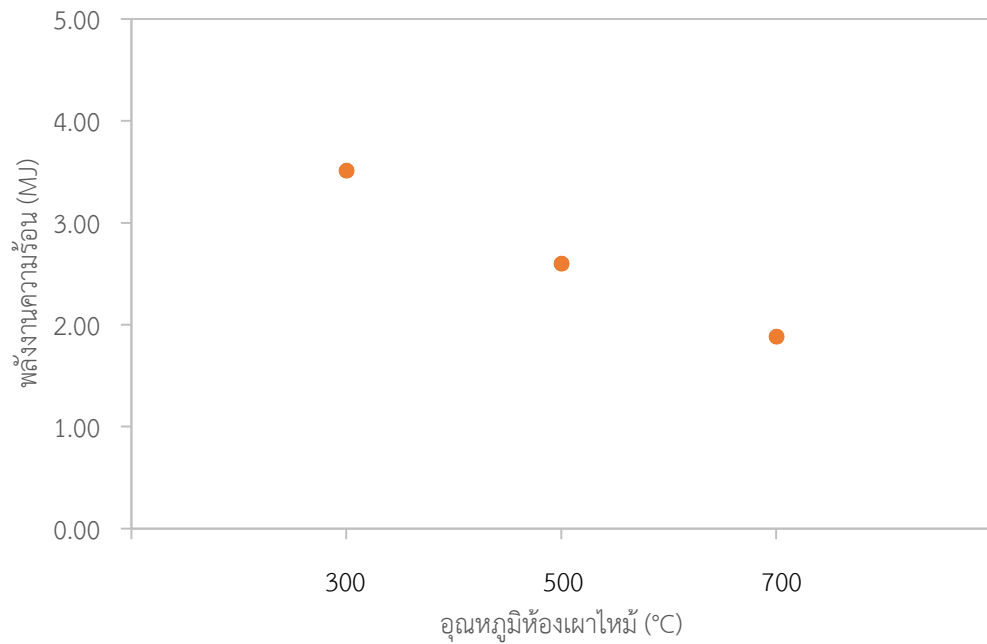
กล่าวโดยสรุปคือ เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อง และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 7,934.50, 9,642.24 และ 12,728.65 MJ คิดเป็น 27.94, 37.59 และ 42.76 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C

ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลขององค์ประกอบก๊าซในไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้

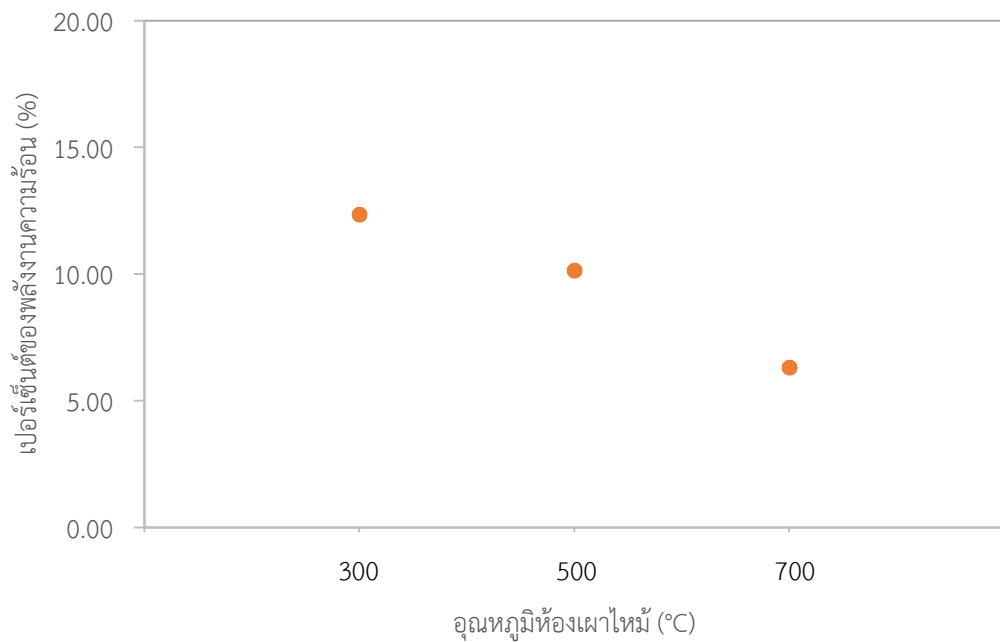
พารามิเตอร์	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (°C)		
	300	500	700
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO <sub>2</sub> (kg/s)	0.001	0.002	0.005
ไอน้ำ H <sub>2</sub> O (kg/s)	0.002	0.003	0.006
ก๊าซไนโตรเจน N <sub>2</sub> (kg/s)	0.007	0.012	0.024
ก๊าซออกซิเจน O <sub>2</sub> (kg/s)	0.002	0.003	0.004
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ CO (kg/s)	-	-	-
รวม	0.012	0.020	0.038

#### 4.3 ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ

รูปที่ 4.5 ก และ ข แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ แกนตั้งของรูปที่ 4.5 ก แสดงพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็น MJ แกนตั้งของรูปที่ 4.5 ข แสดงพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ แกนนอนของรูปทั้งสองแสดงอุณหภูมิห้องเผาไหม้ มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบลดลง 3.51, 2.60 และ 1.88 MJ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์พลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ พบว่ามีแนวโน้มลดลง คิดเป็น 12.37, 10.12 และ 6.33 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามกฎการอนุรักษ์พลังงานพบว่าภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้น พลังงานความร้อนขาเข้า หักกับพลังงานความร้อนสูญเสีย จะได้พลังงานที่เหลือภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยพลังงานความร้อนที่เหลือภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่กล่าวถึงนี้เป็นพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นและพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าพลังงานความร้อนที่เหลือภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อย ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อยส่งผลให้ พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นและพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบมีแนวโน้มลดลง



4.5 (ก) พลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ (MJ)



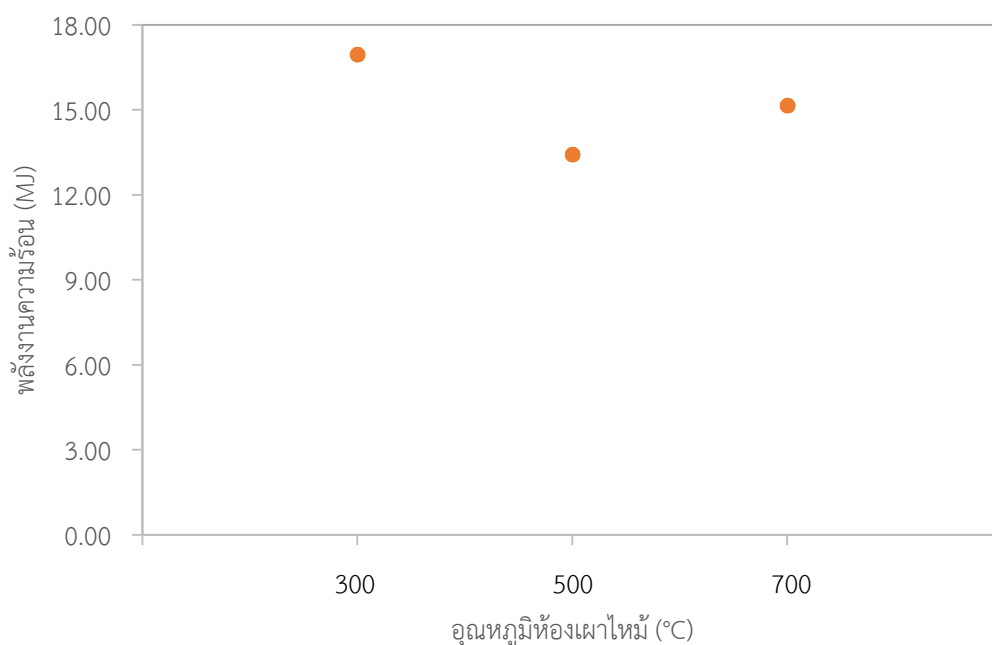
4.5 (ข) พลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ (%)

รูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ

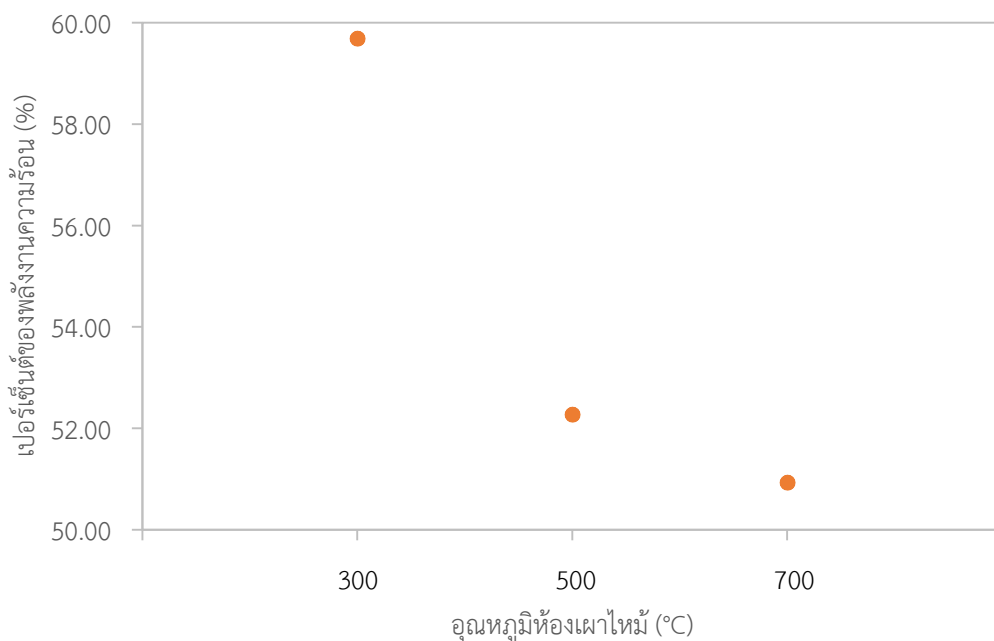
กล่าวโดยสรุปคือ เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบมีแนวโน้มลดลง 3.51, 2.60 และ 1.88 MJ คิดเป็น 12.37, 10.12 และ 6.33% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น

รูปที่ 4.6 ก และ ข แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ แกนตั้งของรูปที่ 4.6 ก แสดงพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็น MJ แกนตั้งของรูปที่ 4.6 ข แสดงพลังงานความร้อน มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ แกนนอนของรูปทั้งสองแสดงอุณหภูมิห้องเผาไหม้ มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นในช่วงหลังคือ 16.95, 13.41 และ 15.16 MJ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นพบว่า มีแนวโน้มลดลง คิดเป็น 59.69, 52.29 และ 50.91 % ตามลำดับ โดยค่าพลังงานความร้อนในส่วนนี้ได้จากผลต่างของค่าพลังงานขาเข้าหักด้วยผลรวมของค่าพลังงานความร้อนสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในระบบ



4.6 (ก) พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น (MJ)



#### 4.6 (ข) พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน (%)

รูปที่ 4.6 แสดงผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ

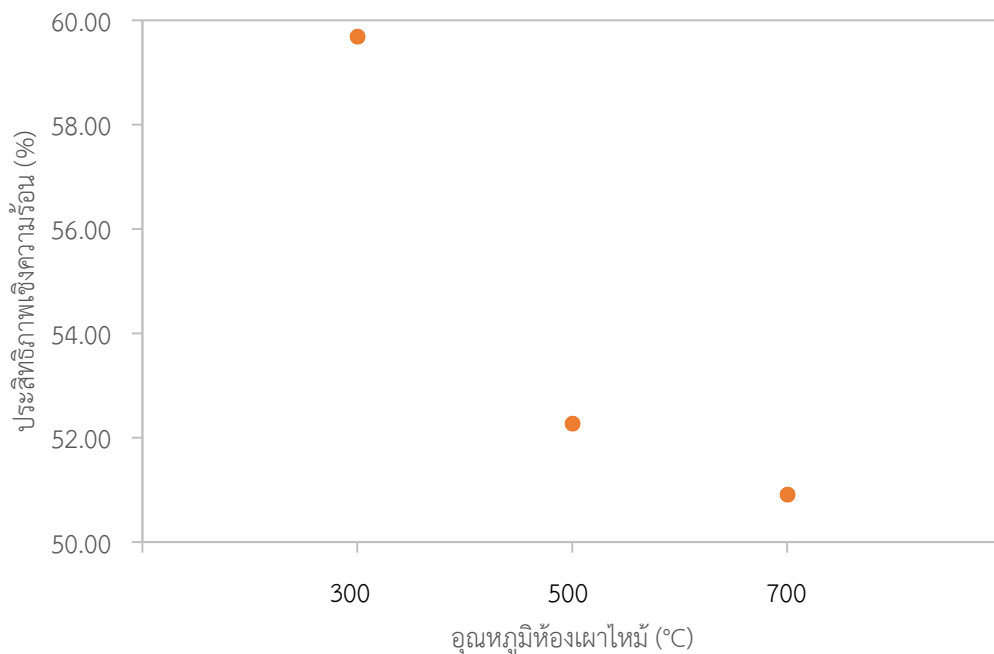
กล่าวโดยสรุปคือ เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน มีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน พบว่ามีแนวโน้มลดลงพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน เป็น 16.95, 13.41 และ 15.16 MJ คิดเป็น 59.69, 52.29 และ 50.91 % ตามลำดับ

#### 4.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชันชนิดดรัมหมุน

รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชันชนิดดรัมหมุน ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ แกนตั้ง แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน มีหน่วยเป็น % แกนนอนแสดงอุณหภูมิห้องเผาไหม้ มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลง 59.69, 52.29 และ 50.91 % ตามลำดับ นอกจากนี้สังเกตได้ว่าระยะเวลาการทำความร้อนที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 700 °C มากกว่าระยะเวลาในการทำความร้อนที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ 300 °C เกือบ 3 ขณะที่ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชันมีค่าแตกต่างกันเพียง



เล็กน้อย ดังนั้น ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 700 °C จึงเหมาะสมกว่าเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ



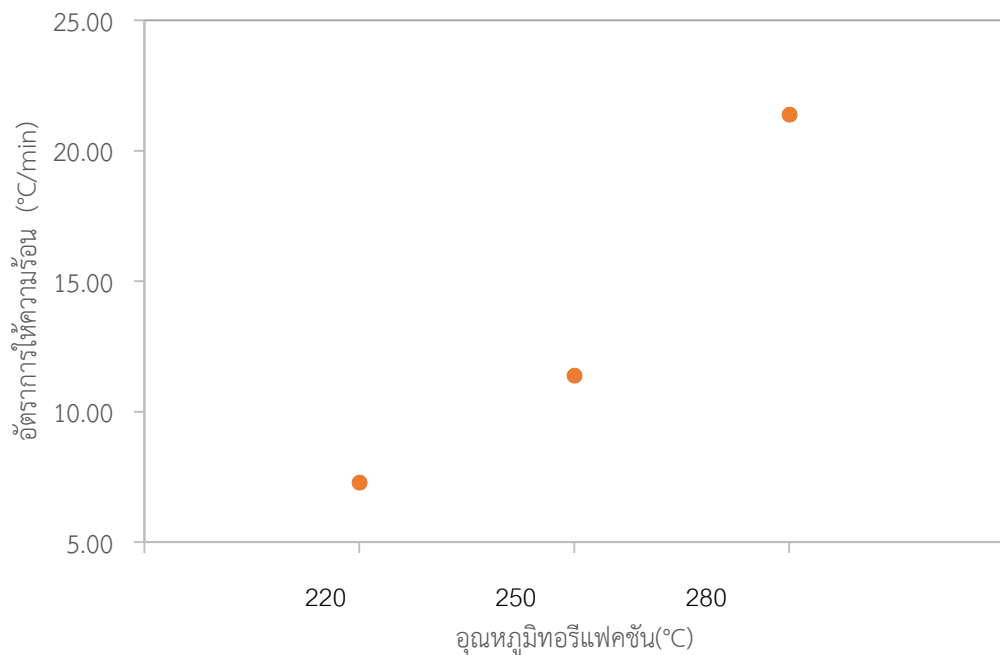
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ

กล่าวโดยสรุปคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่างๆ มีค่าเท่ากับ 59.69, 52.29 และ 50.91 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300, 500 และ 700 °C

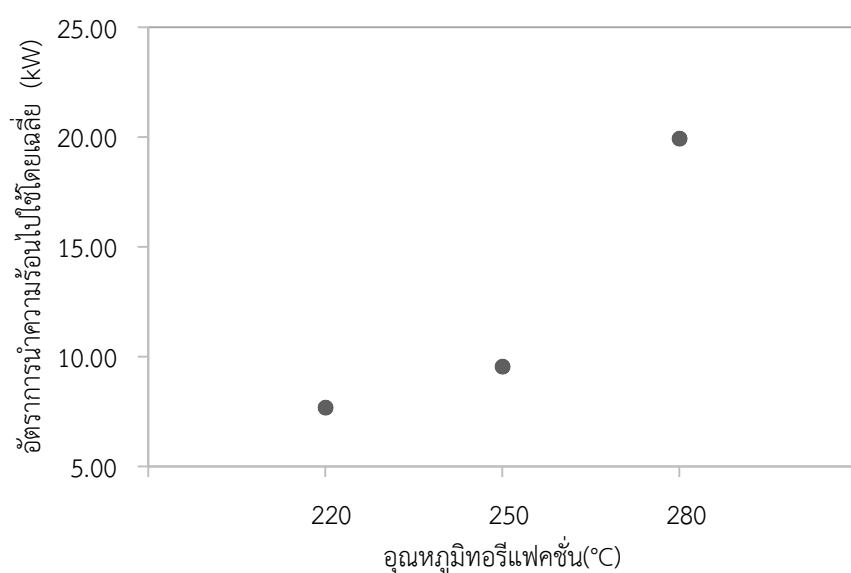
#### 4.6 ผลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่มีต่ออัตราการให้ความร้อน

รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ แกนตั้ง แสดงอัตราการให้ความร้อน มีหน่วยเป็น °C/min แกนนอนแสดงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่น เพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จาก 7.29, 11.4 และ 21.4 °C/min ตามลำดับ แนวโน้มดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นกับอัตราการนำความร้อนไปใช้โดยเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่น เพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C ส่งผลให้อัตราการนำความร้อนไปใช้โดยเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จาก 7.69, 9.56 และ 19.94 kW ตามลำดับ เมื่อทอรีแฟคชั่นสูง ความชันของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิห้องเผาไหม้กับอุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิห้องเผาไหม้ไปยังซีลื้อยได้มากขึ้น ซึ่งชัดเจนว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการให้

ความร้อนนั้นส่งผลต่ออัตราการนำความร้อนไปใช้โดยเฉลี่ยด้วย และยังพบว่าอุณหภูมิทอรีแพคชั้นเพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C ส่งผลให้ระยะเวลาในการให้ความร้อนมีแนวโน้มลดลง จาก 2,203, 1,403 และ 760 s ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้นต่างๆ



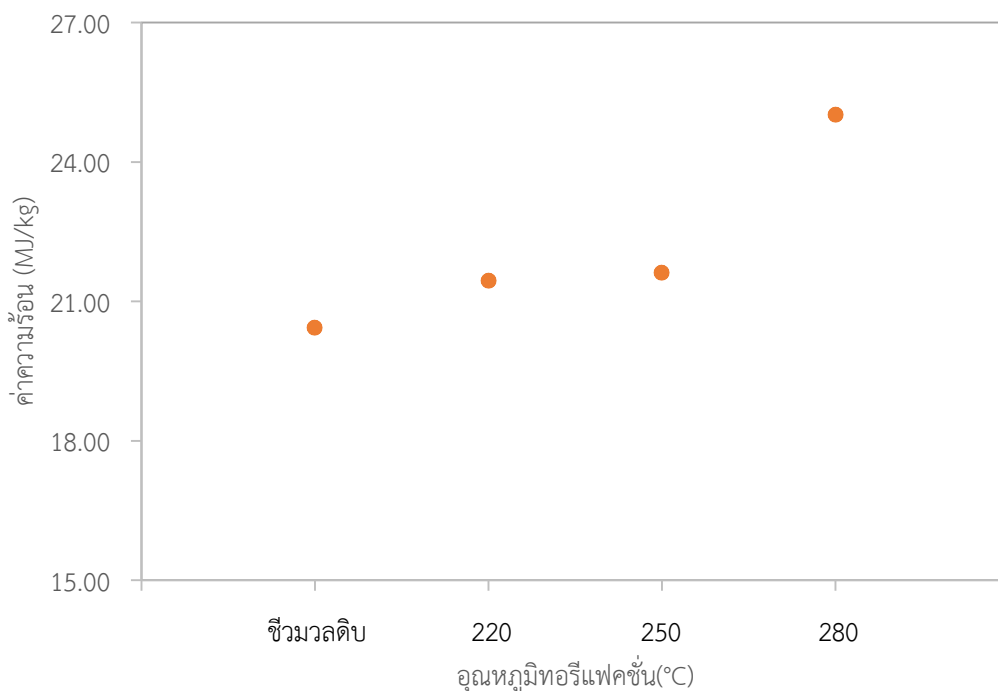
รูปที่ 4.9 แสดงอัตราการนำความร้อนไปใช้โดยเฉลี่ย ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้นต่างๆ

กล่าวโดยสรุปคือ อัตราการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้นต่างๆ มีค่าเท่ากับ 7.29, 11.4 และ 21.4 °C/min ตามลำดับ อัตราการนำความร้อนไปใช้โดยเฉลี่ย ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น

ต่างๆ มีค่าเท่ากับ 7.69, 9.56 และ 19.94 kW ตามลำดับ และระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้นต่างๆ มีค่าเท่ากับ 2,203, 1,403 และ 760 s ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 220, 250 และ 280 °C

#### 4.7 ผลของอุณหภูมิทอรีแพคชั้นที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.10 แสดงค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้นต่างๆ โดยใช้เวลาในการทอรีแพคชั้นสำหรับการทดลอง 45 นาที แกนตั้ง แสดงค่าความร้อน มีหน่วยเป็น MJ/kg แกนนอนแสดงอุณหภูมิทอรีแพคชั้น มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิทอรีแพคชั้น เพิ่มขึ้น จาก 220, 250 และ 280 °C ส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 21.44, 21.63 และ 25.03 MJ/kg ตามลำดับ เมื่อค่าความร้อนของชีวมวลดิบมีค่าเท่ากับ 20.43 MJ/kg นอกจากนี้สังเกตได้ว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการทอรีแพคชั้นแล้วนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากชีวมวลดิบในทุกๆ อุณหภูมิการทอรีแพคชั้นด้วย โดยค่าความร้อนของชีวมวลนี้มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนในโครงสร้าง โดยพบว่าเมื่อสัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น [28] การทอรีแพคชั้นเป็นกระบวนการหนึ่งที่ลดสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนในโครงสร้าง [29] เมื่ออุณหภูมิในการทอรีแพคชั้นเพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลให้สัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนในโครงสร้างลดลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการทอรีแพคชั้นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น [30]



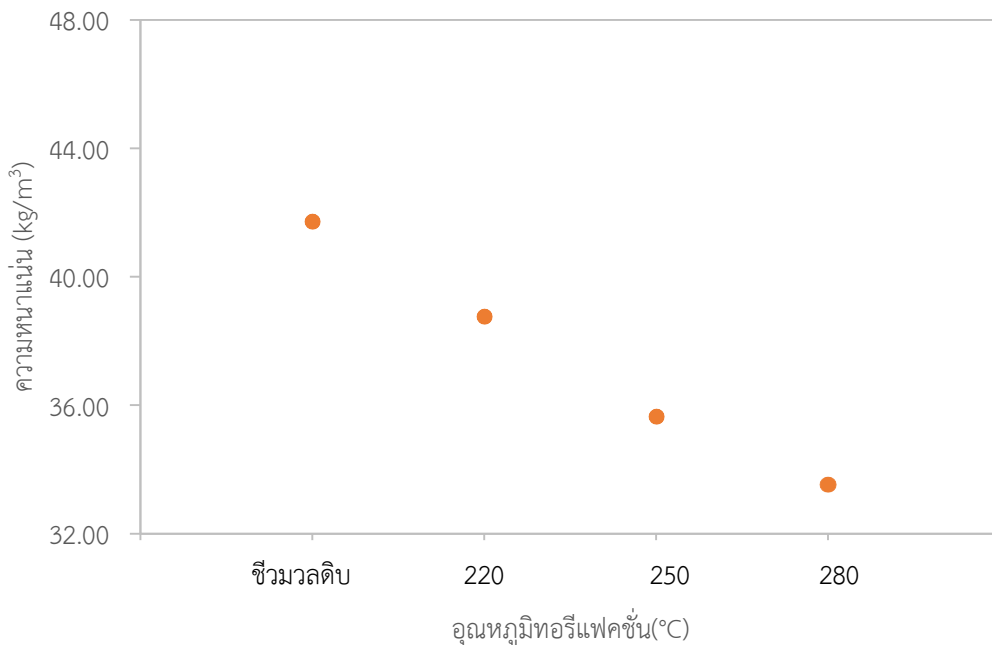
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆ

กล่าวโดยสรุปคือ ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 21.44, 21.63 และ 25.03 MJ/kg ตามลำดับ อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 220, 250 และ 280 °C เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของซีวมวลดิบมีค่าเท่ากับ 20.43 MJ/kg

#### 4.8 ผลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.11 แสดงค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันต่างๆ โดยใช้ เวลาในการทอรีแฟคชันสำหรับทุกๆการทดลอง 45 นาที แกนตั้ง แสดงค่าความหนาแน่น มีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$  แกนนอนแสดงอุณหภูมิทอรีแฟคชัน มีหน่วยเป็น  $^{\circ}\text{C}$  จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชัน เพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280  $^{\circ}\text{C}$  ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันมีแนวโน้มลดลง คือ 38.77, 35.64 และ 33.53  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของซีวมวลดิบนั้นมีค่าเท่ากับ 41.74  $\text{kg/m}^3$  โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ หลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันนั้น ส่งผลให้ซีวมวลมีค่าความหนาแน่นลดลง โครงสร้างของซีวมวลจะถูกทำลายด้วยการกระทำทางความร้อนทำให้มันเปราะ และมีน้ำหนักเบา (เนื่องจากการสูญเสียมวลในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชัน) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่า เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นของซีวมวลดิบ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อความชื้นและปริมาณรูพรุนที่ลดลงในผลิตภัณฑ์

[29] จึงกล่าวได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

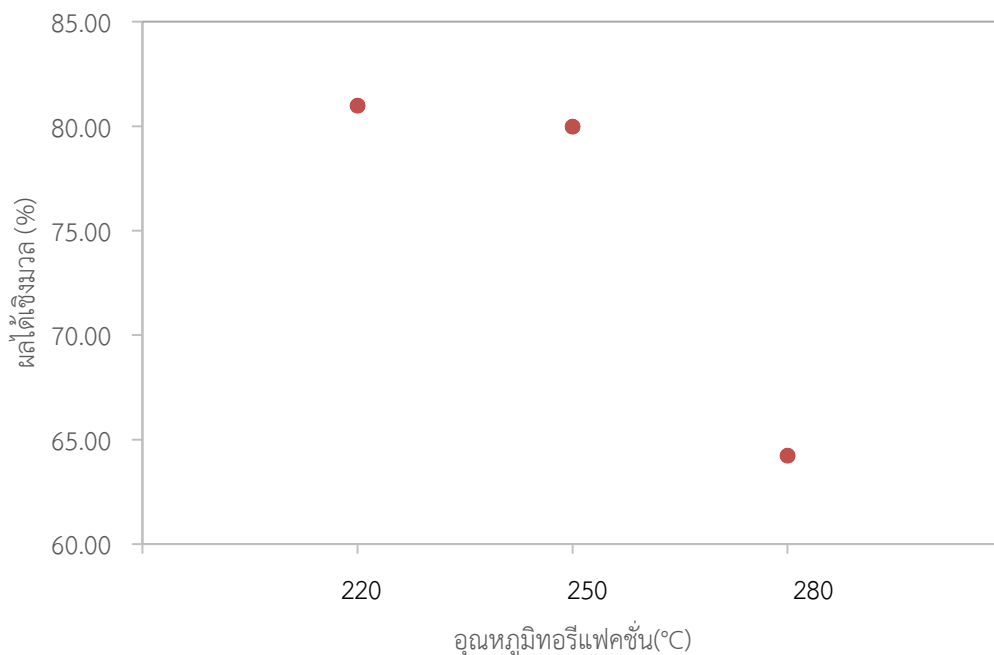


รูปที่ 4.11 แสดงค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ

กล่าวโดยสรุปคือ ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ มีค่าเท่ากับ 38.77, 35.64 และ 33.53 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 220, 250 และ 280 °C

#### 4.9 ผลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่มีต่อผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์

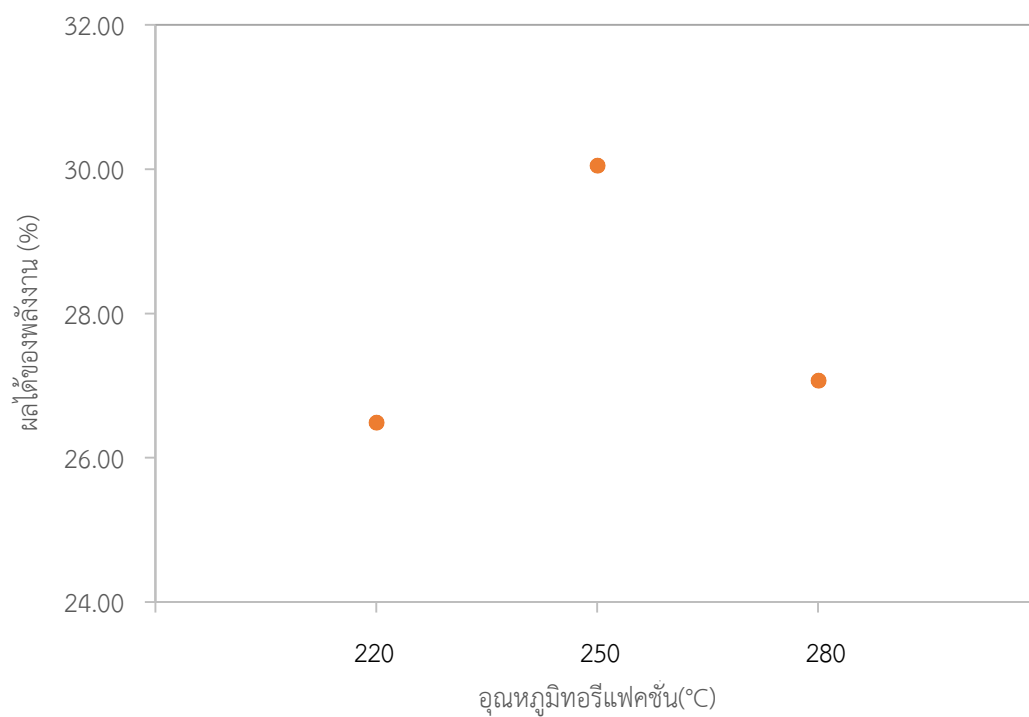
รูปที่ 4.12 แสดงผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ แกนตั้ง แสดงผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ มีหน่วยเป็น % แกนนอนแสดงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่น เพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ มีแนวโน้มลดลง 81, 80 และ 64.25 % ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการลดลงของมวลแห้งในผลิตภัณฑ์ อย่างหนึ่งคือ ความชื้น และการสลายตัวทางความร้อนของกระบวนการ โดยสลายโครงสร้างภายในชีวมวลเหล่านี้ไปอยู่ในรูปของก๊าซ เช่น H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, acetic acid และสารอินทรีย์อื่นๆ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชั่นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การลดลงของมวลแห้งของผลิตภัณฑ์ลดลง และส่งผลให้ผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ลดลงตามลำดับ [29]



รูปที่ 4.12 แสดงผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั่นต่างๆ กล่าวโดยสรุปคือ ผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั่นต่างๆ มีค่าเท่ากับ 81, 80 และ 64.25 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั่น 220, 250 และ 280 °C

#### 4.10 ผลของอุณหภูมิทอรีแพคชั่นที่มีต่อผลได้พลังงาน

รูปที่ 4.13 แสดงผลได้พลังงาน ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั่นต่างๆ แกนตั้ง แสดงผลได้ของพลังงาน มีหน่วยเป็น % แกนนอนแสดงอุณหภูมิทอรีแพคชั่น มีหน่วยเป็น °C จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิทอรีแพคชั่น เพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C ส่งผลให้ผลได้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงในช่วงหลัง 26.48, 30.06 และ 27.07 % ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทอรีแพคชั่นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงหลัง และพบว่าทำให้ผลได้พลังงานที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.13 แสดงผลได้ของพลังงาน ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ  
กล่าวโดยสรุปคือ ผลได้พลังงาน ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ 26.48, 30.06 และ 27.07  
% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 220, 250 และ 280 °C



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เตาทอรีแฟคชั่นแบบดรัมหมุนขนาดเล็กนั้น เป็นการออกแบบและสร้างระบบที่ใช้เพื่อตอบสนองการใช้งานในระดับครัวเรือนที่ต้องการเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และง่ายต่อการใช้งาน เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อสมมูลพลังงานของเตาทอรีแฟคชั่นแบบดรัมหมุนขนาดเล็ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิห้องเผาไหม้ อัตราการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ และศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่างๆ โดยสมมุติฐานของงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน ของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน และอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นมีผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล ได้แก่ ค่าความร้อน และความหนาแน่น ในการวิจัยนี้ใช้ชีวมวลที่นำมาทอรีแฟคชั่นคือ ชี้เลื้อย ขนาดอนุภาคขนาด  $1386 \pm 65 \mu\text{m}$  และความชื้นเริ่มต้น  $8 \pm 1 \%$  มาตรฐานเปียก กำหนดให้ความเร็วในการหมุนดรัมมีค่าคงที่ที่ 3.75 rpm และใช้ LPG เป็นแหล่งให้ความร้อน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ทำการทอรีไฟร์ชีวมวลที่อุณหภูมิ 300 °C โดยแปรค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ 3 ค่า ได้แก่ 300, 500 และ 700 °C ตามลำดับ และแปรค่าอุณหภูมิทอรีไฟร์ 3 ค่า ได้แก่ 220, 250 และ 280 °C ตามลำดับ โดยกำหนดให้ระยะเวลาในการทอรีไฟร์เท่ากับ 45 นาที ผลการวิจัยที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### - สมมูลพลังงานความร้อนของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน

ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ สูญเสียไปกับพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อง และพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบเป็นส่วนใหญ่

#### - ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อง

เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่อง และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากไอเสียที่ปล่องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 7.93, 9.64 และ 12.73 MJ คิดเป็น 27.94, 37.59 และ 42.76 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C

#### - ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ

เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบ และเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนสูญเสียที่ผิวผนังของชุดให้ความร้อนแก่ระบบมีแนวโน้มลดลง 3.51, 2.60 และ 1.88 MJ คิดเป็น 12.37, 10.12 และ 6.33% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C



**- ผลของอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่มีต่อพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน**

เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน มีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน พบว่ามีแนวโน้มลดลงพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชัน เป็น 16.95, 13.41 และ 15.16 MJ คิดเป็น 59.69, 52.29 และ 50.91 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C

**- ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชันชนิดตรึงหมุน**

เมื่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทอรีแฟคชันชนิดตรึงหมุน มีแนวโน้มลดลง มีค่าเท่ากับ 59.69, 52.29 และ 50.91 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ เพิ่มขึ้นจาก 300, 500 และ 700 °C

**- ผลของอุณหภูมิตอรีแฟคชันที่มีต่ออัตราการให้ความร้อน**

เมื่ออุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ อัตราการให้ความร้อน, อัตราการนำความร้อนไปใช้โดยเฉลี่ย และ ระยะเวลาในการให้ความร้อน มีค่าเท่ากับ 7.29, 11.4 และ 21.4 °C/min, 7.69, 9.56 และ 19.94 kW และ ที่ 2,203, 1,403 และ 760 s ตามลำดับ ที่อุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C

**- ผลของอุณหภูมิตอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์**

เมื่ออุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 20.61, 20.96 และ 24.66 MJ/kg ตามลำดับ ที่อุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C

**- ผลของอุณหภูมิตอรีแฟคชันที่มีต่อค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์**

เมื่ออุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ที่มีแนวโน้มลดลง มีค่าเท่ากับ 38.77, 35.64 และ 33.53 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ที่อุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C

**- ผลของอุณหภูมิตอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์**

เมื่ออุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ มีแนวโน้มลดลง มีค่าเท่ากับ 81, 80 และ 64.25 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C

**- ผลของอุณหภูมิตอรีแฟคชันที่มีต่อผลได้พลังงาน**

เมื่ออุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลได้พลังงาน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงหลัง มีค่าเท่ากับ 26.48, 30.06 และ 27.07 %ตามลำดับ ที่อุณหภูมิตอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจาก 220, 250 และ 280 °C

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 1. ปรับปรุงประสิทธิภาพของเตา

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุนให้มีการทำงานในรูปแบบการป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง เพื่อขยายกำลังในการผลิตให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ตอบรับกับโจทย์การใช้งานในอนาคต



## รายการอ้างอิง

- [1] T. G. Bridgeman, J. M. Jones, I. Shield, and P. T. Williams, (2008),"Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties," *Fuel*, vol. 87, no. 6, pp. 844-856.
- [2] D. Medic, M. Darr, A. Shah, B. Potter, and J. Zimmerman, (2012),"Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading," *Fuel*, vol. 91, no. 1, pp. 147-154.
- [3] J. Deng, G.-j. Wang, J.-h. Kuang, Y.-l. Zhang, and Y.-h. Luo, (2009),"Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 86, no. 2, pp. 331-337.
- [4] J. P. D. Bourgeois, J., (1984),"Torrefied wood from temperate and tropical species. Advantages and prospects.," *Bioenergy Proceedings of conference* vol. 3, pp. pp.153-159.
- [5] W.-H. Chen and P.-C. Kuo, (2011),"Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6451-6460.
- [6] Y. Uemura, W. N. Omar, T. Tsutsui, and S. B. Yusup, (2011),"Torrefaction of oil palm wastes," *Fuel*, vol. 90, no. 8, pp. 2585-2591.
- [7] I. S. Bimal Acharya, Animesh Dutta,, (2012),"A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 2, no. 4, pp. 349-369.
- [8] M. J. Wang, Y. F. Huang, P. T. Chiueh, W. H. Kuan, and S. L. Lo, (2012),"Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues," *Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 177-184.
- [9] J. Gerstle, (1980),"Fluidized bed drying of solids."
- [10] H. Li, X. Liu, R. Legros, X. T. Bi, C. Jim Lim, and S. Sokhansanj, (2012),"Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 680-685.
- [11] B. Colin, J. L. Dirion, P. Arlabosse, and S. Salvador, (2015),"Wood chips flow in a

- rotary kiln: Experiments and modeling," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 98, pp. 179-187.
- [12] r. e. world. (2017). *Torrefaction Cracks the Biomass Challenge - Renewable Energy World*. Available: <http://www.renewableenergyworld.com/index/blog/all.html>
- [13] J. F. M. D. T. Mayrose, (2000),"A Comparison of Fluid Bed and Multiple Hearth Biosolids Incineration," *Paper Presented At The 14th Annual Residuals & Sludge Management Conference*,.
- [14] Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy. (2016). *Biomass*. Available: <http://www2.dede.go.th/kmmf/download>
- [15] D. O. R.-C. Hall, F. ; Woods, J.; Williams, R.H. , *Biomass for energy: Supply prospects*. United States: Island Press, Washington, DC (United States), 1993.
- [16] F. D. a. Offices. (2017). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Available: <http://www.fao.org/home/en/>
- [17] W.-H. Chen, J. Peng, and X. T. Bi, (2015),"A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 847-866.
- [18] D. Eseltine, S. S. Thanapal, K. Annamalai, and D. Ranjan, (2013),"Torrefaction of woody biomass (Juniper and Mesquite) using inert and non-inert gases," *Fuel*, vol. 113, pp. 379-388.
- [19] A. Sharma, V. Pareek, and D. Zhang, (2015),"Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 1081-1096.
- [20] R. B. Bates and A. F. Ghoniem, (2013),"Biomass torrefaction: modeling of reaction thermochemistry," *Bioresour Technol*, vol. 134, pp. 331-40.
- [21] E. Sermyagina, J. Saari, B. Zakeri, J. Kaikko, and E. Vakkilainen, (2015),"Effect of heat integration method and torrefaction temperature on the performance of an integrated CHP-torrefaction plant," *Applied Energy*, vol. 149, pp. 24-34.
- [22] B. Ghiasi *et al.*, (2014),"Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification?," *Applied Energy*, vol. 134, pp. 133-142.
- [23] C. Park, U. Zahid, S. Lee, and C. Han, (2015),"Effect of process operating

- conditions in the biomass torrefaction: A simulation study using one-dimensional reactor and process model," *Energy*, vol. 79, pp. 127-139.
- [24] J. Phusrimuang and T. Wongwuttanasatian, (2016),"Improvements on thermal efficiency of a biomass stove for a steaming process in Thailand," *Applied Thermal Engineering*, vol. 98, pp. 196-202.
- [25] R. K. Rajput, *Thermal Engineering*. Laxmi Publications. 2010.
- [26] p.-b. a. t. d. c. i. s. SAMCO promises complete partner and customer satisfaction through our comprehensive. (2016). *POWER PLANT ENGINEERING (FOR WBSCTE)* By Samsher Gautam. Available: <https://www.samcotech.com/industries/power/>
- [27] H. N. S. Michael J. Moran, Daisie D. Boettner, Margaret B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, . 2014.
- [28] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis*. 2011.
- [29] J. Poudel and S. Oh, (2014),"Effect of Torrefaction on the Properties of Corn Stalk to Enhance Solid Fuel Qualities," *Energies*, vol. 7, no. 9, pp. 5586-5600.
- [30] N. Soponpongpipat, D. Sittikul, and P. Comsawang, (2016),"Prediction model of higher heating value of torrefied biomass based on the kinetics of biomass decomposition," *Journal of the Energy Institute*, vol. 89, no. 3, pp. 425-435.
- [31] R. K. Rajput, *Thermal Engineering*. Laxmi Publications, 2010.
- [32] S. Gautam. (2016). *Power Plant Engineering (WBSCTE)*. Vikas Publishing House.



ภาคผนวก

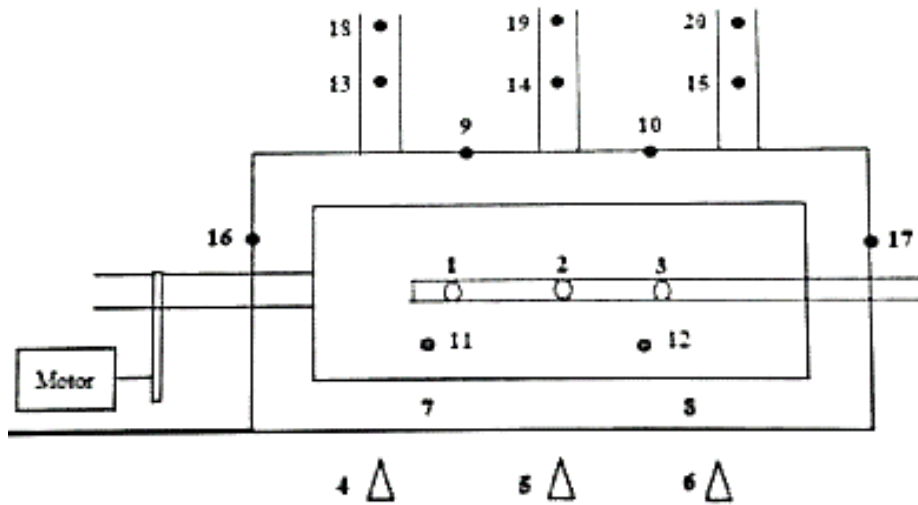
มหาวิทยาลัยศิลปากร



รายละเอียดการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ล หรือ การตรวจวัดอุณหภูมิในระบบ แสดงดัง  
 ตารางผนวก ก.1 และ รูปผนวก ก.1 ดังนี้  
 ตารางผนวก ก 1รายละเอียดการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ล

หมายเลข	ความหมาย
1	อุณหภูมิชีวมวล 1
2	อุณหภูมิชีวมวล 2
3	อุณหภูมิชีวมวล 2
4	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 1
5	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 2
6	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 3
7	อุณหภูมิผิวด้านนอก 1
8	อุณหภูมิผิวด้านนอก 2
9	อุณหภูมิผิวด้านนอก 3
10	อุณหภูมิผิวด้านนอก 4
11	อุณหภูมิผิวด้านนอก 5
12	อุณหภูมิผิวด้านนอก 6
13	อุณหภูมิผิวปล่อง 1
14	อุณหภูมิผิวปล่อง 2
15	อุณหภูมิผิวปล่อง 3
16	อุณหภูมิผิวหัวของเตา
17	อุณหภูมิผิวท้ายของเตา
18	อุณหภูมิปากปล่อง 1
19	อุณหภูมิปากปล่อง 2
20	อุณหภูมิปากปล่อง 3





รูปภาพผนวก ก.1 แสดงรายละเอียดการตรวจวัดอุณหภูมิในระบบ



ภาคผนวก ข  
ตัวอย่างการคำนวณ



## ข.1 ตัวอย่างการคำนวณ

เนื่องจากรายการคำนวณต่างๆในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการคำนวณที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงขอ ยกตัวอย่างการคำนวณ 1 กรณี คือที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### ข.1.1 พลังงานความร้อนขาเข้า

#### ข.1.1.1 พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง

พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้จากผลคูณของมวลของเชื้อเพลิง ไพโตรเลียมเหลว กับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ใช้ สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C มวลของเชื้อเพลิงไพโตรเลียมเหลวที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการทอรีแฟคชั่น มีค่าเท่ากับ 0.62 กิโลกรัม สามารถหาค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงไพโตรเลียมเหลว [31] ได้จากสมการที่

ข.2 คือ

$$Q_f = m_f \times LHV \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ

$m_f$  คือ มวลเชื้อเพลิงไพโตรเลียมเหลว (kg)

$LHV$  คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

$Q_f$  คือ ความร้อนจากเชื้อเพลิง (MJ)

จะได้ว่า

$$Q_f = 6.72 \text{ kg} \times 17,985.01528 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$Q_f = 120,859.30 \text{ kJ} = 120.86 \text{ MJ}$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงไพโตรเลียมเหลวสำหรับการทดลองที่ อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C มีค่าเท่ากับ 28,396 MJ

### ข.1.2 พลังงานความร้อนขาออก

#### ข.1.2.1 พลังงานความร้อนสูญเสีย

##### ข.1.2.1.1 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดจากการเผาไหม้แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอน มอนนอกไซด์เกิดขึ้นแทนที่การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผา ไหม้คาร์บอน 1 กิโลกรัมของเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะมีค่าเท่ากับ 33,800 MJ/kg แต่หากในการเผาไหม้นั้นไม่สมบูรณ์จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์แทนที่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของก๊าซ คาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 10,120 MJ/kg ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เกิดการสูญเสีย ไปกับการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์นี้จึงมีค่าเท่ากับ 23,680 MJ/kg [31] [32] ดังนั้นเพื่อ ตรวจสอบว่ามีพลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในทดลองนั้น จึงได้ ทำการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน ด้วยเครื่อง Fyrite Gas Analyzers พบว่า มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน เท่ากับ 4.33 และ 14.33 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับดังที่ แสดงในตารางผนวก ข.1

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ kmol ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ

เผาไหม้เป็นดังนี้ เริ่มจาก กำหนดให้เชื้อเพลิง ใน 1 kmol มีองค์ประกอบของธาตุ C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> และ S ดังนี้

C = A kmol, H<sub>2</sub> = B kmol, O<sub>2</sub> = D kmol, N<sub>2</sub> = E kmol และ S = F kmol

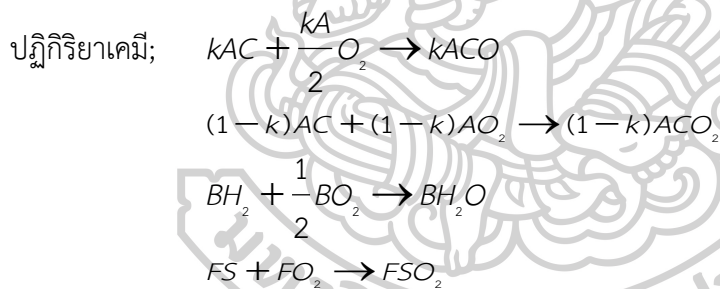
Fraction ที่ตรวจวัดได้ในผลิตภัณฑ์ของปริมาณออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้ ;

O<sub>2</sub> = G และ CO<sub>2</sub> = I

ตารางผนวก ข.1แสดงองค์ประกอบของธาตุตามการวิเคราะห์ ultimate ของเชื้อเพลิง

Element	wt%	Molecular weight	kmol/100 kg	%by mole
C	3.60	12.01	0.30	0.061635878
H <sub>2</sub>	9.20	2.016	4.56	0.938364122
Total	12.8		4.86	1

จากตารางผนวก ข.1 จะพบว่า kmol รวมของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว จำนวน 0.62 กิโลกรัม สามารถหาได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์กับจำนวน kmol รวมของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวต่อ 100 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 0.0301521 จากนั้นนำองค์ประกอบของธาตุที่มีในตัวเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวเขียนสมดุลสมการเคมี เพื่อดูปริมาณของ kmol ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผาไหม้ ดังสมการด้านล่าง



จำนวนโมล O<sub>2</sub> ที่ต้องการใช้ในปฏิกิริยาเคมี =  $\frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B$

ในเชื้อเพลิง 1 kmol มี O<sub>2</sub> อยู่แล้ว = D

ดังนั้นต้องดูด O<sub>2</sub> จากอากาศ =  $\frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B$

จะได้ว่า จะมี N<sub>2</sub> ติดมากับอากาศ =  $3.76 \left[ \frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B \right]$

วิเคราะห์จำนวน kmol ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังต่อไปนี้

$$N_2 = 3.76 \left[ \frac{k}{2}A + (1-k)A + \frac{1}{2}B \right] \quad (\text{ข.2})$$

$$O_2 = \beta \quad (\text{ข.3})$$

$$CO = kA \quad (\text{ข.4})$$

$$CO_2 = (1 - k)A \quad (\text{ข.5})$$

$$H_2O = B \quad (\text{ข.6})$$

$$SO_2 = F \quad (\text{ข.7})$$

จำนวน kmol รวม

$$= 3.76 \left[ \frac{k}{2} A + (1 - k)A + \frac{1}{2} B \right] + \beta + kA + (1 - k)A + A + B$$

$$= 1.88kA + 3.76A - 3.76kA + 1.88B + \beta + kA + A - kA + B$$

$$= (-1.88kA + 4.76)A + 2.88B + \beta \quad (\text{ข.8})$$

Fraction  $O_2$  ในผลิตภัณฑ์

$$G = \beta / [-1.88kA + 4.76A + 2.88B + \beta]$$

$$\beta = G[-1.88kA + 4.76A + 2.88B + \beta]$$

$$\beta = \frac{G[-1.88kA + 4.76A + 2.88B]}{1 - G} \quad (\text{ข.9})$$

และ

$$I = (0 - k)A / [(-1.88k + 4.76)A + 2.88B + \beta]$$

$$(I - k)A = I[-1.88kA + 4.76A + 2.88B + \beta]$$

$$A - kA = -1.88kAI + 4.76AI + I[2.88B + \beta]$$

$$[1.88AI - A]k = [I - 1]A + I[2.88B + \beta]$$

$$k = \frac{[4.76 - 1]A + I[2.88B + \beta]}{[-1.88AI - A]} \quad (\text{ข.10})$$

จำนวน kmol ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากทำการเผาไหม้ต่อ 1 kmol ของอนุกรมที่ห้องเผาไหม้ 300 °C ได้จากสมการที่ข. 2 - ข.7

ตารางผนวก ข.2 จำนวน kg ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการการทดลองที่อนุกรมที่ห้องเผาไหม้ 300 °C

Product (kMole)	(kMole)/1 kmol fuel	(kMole)/ n kmol fuel	kmol <sub>i</sub> /kmol <sub>total</sub>	kg <sub>i</sub> /kmol <sub>i</sub>	kg <sub>i</sub>
CO	-0.099	-0.002995757	-0.026743009	28.0095	-0.74905831
CO <sub>2</sub>	0.161	0.004854208	0.043333333	44.009	1.907056646
H <sub>2</sub> O	0.938	0.028293651	0.252576343	18.0155	4.550289109
O <sub>2</sub>	0.533	0.016056228	0.143333333	31.999	4.586523333
N <sub>2</sub>	2.183	0.065811864	0.5875	28.013	16.45763749
Total		0.112020193	1		26.75244827

ดังนั้น เเปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ จึงมาจากการนำสัดส่วนของจำนวน kmol ของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ กับ kmol รวมของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดคูณ 100 มีค่าเท่ากับ - 74.905831 จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ [31] ดังสมการที่ จ.12

$$Q_{kp} = \frac{CO \times C_r}{CO_2 + CO} \times 23,680 \text{ kJ / kg} \quad (\text{ข.11})$$

เมื่อ  $CO, CO_2$  คือ % โดยปริมาตรของไอเสีย

$C_r$  คือ สัดส่วนของคาร์บอนในเชื้อเพลิง 1 kg

$Q_{kp}$  คือ ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (MJ)

แต่เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เป็นลบ ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ข.1.2.1.2 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนัง

การสูญเสียความร้อนที่ผิวผนังของระบบนั้นมี 2 รูปแบบคือ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน และการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน ดังแสดงในสมการที่ จ.16

$$Q_{sf} = \sum_{i=1}^n hA_s (T_{s,i} - T_\alpha) + \sum_{i=1}^n \epsilon A_s \sigma (T_{s,i}^4 - T_\alpha^4) \quad (\text{ข.12})$$

เมื่อ  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{W/m}^2\text{C}$ )

$A_s$  คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับการไหล ( $\text{m}^2$ )

$T_{s,i}$  คือ อุณหภูมิไอเสียที่อุณหภูมิ  $i$  (K)

$T_\alpha$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

$\epsilon$  คือ ค่าการแผ่รังสี emissivity มีค่าเท่ากับ 0.77

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

การคำนวณการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนนั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ข.16 โดยพื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับการไหลนั้นแสดงดังรายละเอียดในตารางผนวก ง. 3 การแลกเปลี่ยนความร้อนมีทั้งหมด 7 ด้าน ดังแสดงในตารางผนวก ข.4 ส่วนการคำนวณการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนนั้น จะมีรายละเอียดการคำนวณเพิ่มเติม ดังสมการที่ ข.13 -ข. 16 การคำนวณหาค่า  $h$  ของผนังภายนอกเตาในแต่ละด้านดังนี้โดยการหาค่าสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิฟิล์ม (Film temperature,  $T_{f,i} = (T_{s,i} - T_\alpha)/2$ ) การคำนวณการสูญเสียทั้งสองอย่างนี้จะคำนวณทุกๆวินาที โดยค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนังจะเกินจากผลรวมจากวินาทีที่ 1 ถึงวินาทีที่  $n$  ของการคำนวณความร้อนสูญเสียทั้งสอง

ตารางผนวก ข.3แสดงพื้นที่ผิวผนังในการแลกเปลี่ยนความร้อน

ตำแหน่งผนัง	พื้นที่ผิวผนัง, $A_s$ ( $m^2$ )	ความสูงของผนัง, $L_c$ (m)
1	0.820	0.58
2	0.820	0.58
3	0.264	0.03
4	0.2642	0.03
5	0.0792	0.21
6	0.079168	0.21
7	0.079168	0.21

การหาค่าเรย์ลี (Rayleigh number) แสดงดังสมการที่ ข.13

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\alpha)L_c^3 Pr}{\nu^2} \quad (\text{ข.13})$$

เมื่อ  $Ra$  คือ Rayleigh number

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก  $0.98$  ( $m/s^2$ )

$\beta$  คือ volumetric thermal expansion coefficient

$$1/(T_s + T_\alpha) \text{ (K}^{-1}\text{)}$$

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิวชุดให้ความร้อนแก่กระบวนการ (K)

$T_\alpha$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

$L_c$  คือ ความสูงของชุดให้ความร้อนแก่กระบวนการ (m)

$Pr$  คือ Prandtl number

$\nu$  คือ kinematic viscosity ( $m^2/s$ )

ค่านัสเซสนัมเบอร์ (Nusselt number) แสดงดังสมการที่ ข.14 และ ข.15

$$Nu = 0.59Ra^{1/4}; (Ra < 10^9) \quad (\text{ข.14})$$

$$Nu = 0.1Ra^{1/3}; (10^{10} < Ra < 10^{13}) \quad (\text{ข.15})$$

เมื่อ  $Nu$  คือ Nusselt number

จากนั้น สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ได้ดังสมการที่ 16

$$h = \frac{Nu \times k}{L_c} \quad (\text{ข.16})$$

เมื่อ  $h$  คือ Thermal Conductivity ( $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ )

ค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนังแต่ละด้านเนื่องจากการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนนั้นจึงสามารถสรุปได้ดังตารางผนวก ข.5 ตารางผนวก ข.4 แสดงสรุปค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียความร้อนที่ผิวผนัง

ทิศของผิวผนัง	$Q_{conv}$ (MJ)	$Q_{rad}$ (MJ)
1	379.0098	547.976
2	339.5799	489.1998
3	76.08973	53.53241
4	93.79473	65.00498
5	0	-2.305794
6	633.884	95.18705
7	643.2952	96.92915
รวม	2,165.653	1,345.524

จึงสรุปได้ว่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ผิวผนังสำหรับที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C มีค่าเท่ากับ 2,165.653+1,345.524= 3,511.177 MJ

ข.1.2.1.3 พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสีย

พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียนั้น สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบไอเสีย เมื่อทราบว่าก๊าซไอเสียที่ไหลออกมาทางปากปล่องนั้น ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้สมการที่ ข.17

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{st_1} = & \frac{\dot{m}_{H_2O, flue}}{M_{H_2O}} \int_{T_a}^{T_v} \bar{C}_{p, H_2O} dT + \frac{\dot{m}_{CO_2, flue}}{M_{CO_2}} \int_{T_a}^{T_v} \bar{C}_{p, CO_2} dT \\ & + \frac{\dot{m}_{CO, flue}}{M_{CO}} \int_{T_a}^{T_v} \bar{C}_{p, CO} dT + \frac{\dot{m}_{O_2, flue}}{M_{O_2}} \int_{T_a}^{T_v} \bar{C}_{p, O_2} dT \\ & + \frac{\dot{m}_{N_2, flue}}{M_{N_2}} \int_{T_a}^{T_v} \bar{C}_{p, N_2} dT \end{aligned} \quad (ข.17)$$

- เมื่อ  $\dot{m}_{H_2O, flue}$  คือ อัตราการไหลของไอน้ำเมื่อเกิดการเผาไหม้ (kg/s)  
 $M_{H_2O}$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 18.015 kg/kmol  
 $\bar{C}_{p, H_2O}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ อ้างอิงจาก Table A.13 [33]  
 $\dot{m}_{CO_2, flue}$  คือ อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเกิดการเผาไหม้ (kg/s)



$M_{CO_2}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 44.009 kg/kmol
$\bar{C}_{p,CO_2}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อ้างอิงจาก Table A.13 [33]
$\dot{m}_{CO_2,flue}$	คือ อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เมื่อเกิดการ เผาไหม้ (kg/s)
$M_{CO}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีค่า เท่ากับ 28.0098 kg/kmol
$\bar{C}_{p,CO}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนมอนนอก ไซด์อ้างอิงจาก Table A.13 [33]
$\dot{m}_{O_2,flue}$	คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้ (kg/s)
$M_{O_2}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 31.999 kg/kmol
$\bar{C}_{p,O_2}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน อ้างอิงจาก Table A.13 [33]
$\dot{m}_{N_2,flue}$	คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้ (kg/s)
$M_{N_2}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 kg/kmol
$\bar{C}_{p,N_2}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน อ้างอิงจาก Table A.13 [33]
$\dot{Q}_{s,i}$	คือ อัตราพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่อง ไอเสียที่วินาทีที่ $i$ (MJ/s)

อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C แสดงดังตาราง 4.2 ซึ่งพบว่าอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 1.91, 4.55, 4.59 และ 16.46 กิโลกรัมตามลำดับ และระยะเวลาที่ดำเนินการเผาไหม้เท่ากับ 2,203 วินาที จะสามารถหาอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน ได้คือ 0.000865663, 0.002065497, 0.002081944 และ 0.007470557 kg/s ตามลำดับ

เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของการทดลองมีค่าเท่ากับ 32.5 °C หรือที่ 305.65 K เพื่อให้ง่ายในการใช้ตาราง A.13 และอุณหภูมิของไอเสียเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง โดยทำการตรวจวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิที่ได้ทุกๆ 1 วินาที ด้วยเครื่อง midi LOGGER GL 820 และ เครื่อง midi

LOGGER GL 220 จึงสามารถคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ณ ช่วงเวลานั้นๆ ในที่นี้ จะยกตัวอย่างการคำนวณในวินาทีที่ 1 ของการทดลองดังนี้

$$\begin{aligned}
 Q_{st_1} &= \frac{0.000869663 \text{ kg} / \text{s}}{44.009 \text{ kg} / \text{kmol}} \times (337.1676667 - 5.175) \text{ kJ} / \text{kmol} \\
 &+ \frac{0.002065497 \text{ / s}}{18.0155 \text{ kg} / \text{kmol}} \times (292.9486667 - 4.65) \text{ kJ} / \text{kmol} \\
 &+ \frac{0.007470557 \text{ kg} / \text{s}}{28.013 \text{ kg} / \text{kmol}} \times (252.8421667 - 4.05) \text{ kJ} / \text{kmol} \\
 &+ \frac{0.002081944 \text{ kg} / \text{s}}{31.999 \text{ kg} / \text{kmol}} \times (256.6595 - 4.05) \text{ kJ} / \text{kmol} \\
 Q_{st_1} &= 0.122368 \text{ kJ} / \text{s}
 \end{aligned}$$

จากนั้นทำการคำนวณทุกๆวินาทีตลอดการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ดำเนินการทดลองจำนวน 2,203 วินาทีดังที่กล่าวข้างต้น พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียรวมจึงมีค่าเท่ากับ

$$Q_{st} = \sum_{i=1}^n (Q_{st_i})$$

เมื่อ  $Q_{st}$  คือค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสีย (MJ)

$$Q_{st} = 2,912.959037 \text{ kJ} = 2.91 \text{ MJ}$$

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากสูญเสียที่ปล่องไอเสียรวมสำหรับที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C มีค่าเท่ากับ 7,934.496531 MJ

ข.1.2.2 พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการทอรีแฟคชั่น

ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการทอรีแฟคชั่นหาได้จากค่าพลังงานความร้อนค่าเข้าลบด้วยพลังงานความร้อนที่สูญเสีย จะได้ว่า

$$Q_{uf} = Q_f - (Q_{icp} + Q_{st} + Q_{sf})$$

เมื่อ  $Q_{uf}$  คือ ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการทอรีแฟคชั่น(MJ)

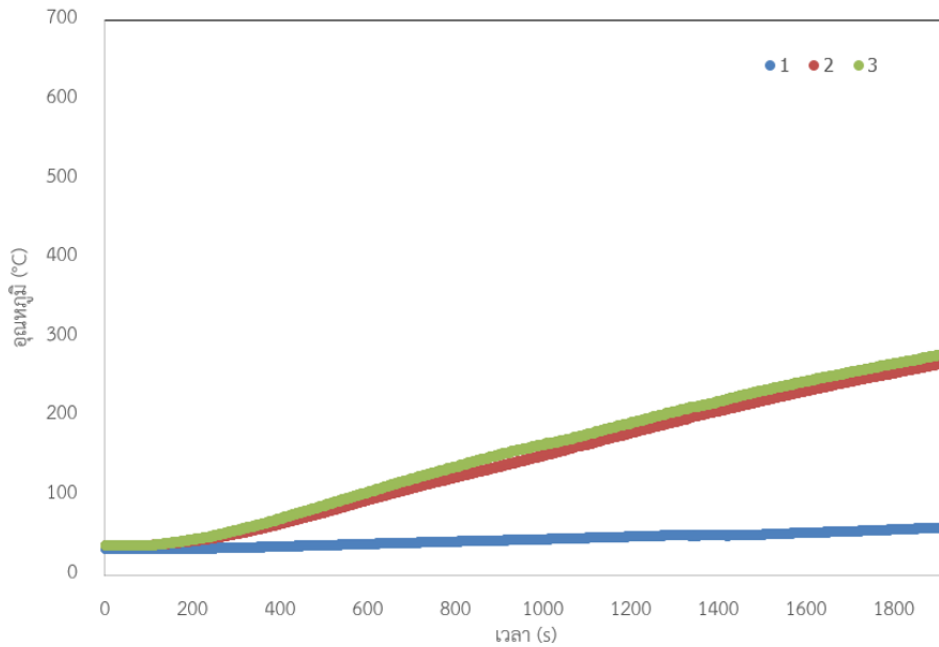
$$Q_{uf} = 28,396.00 - (0.00 + 3,511.16 + 7,934.50)$$

$$Q_{uf} = 16,950.33 \text{ kJ}$$

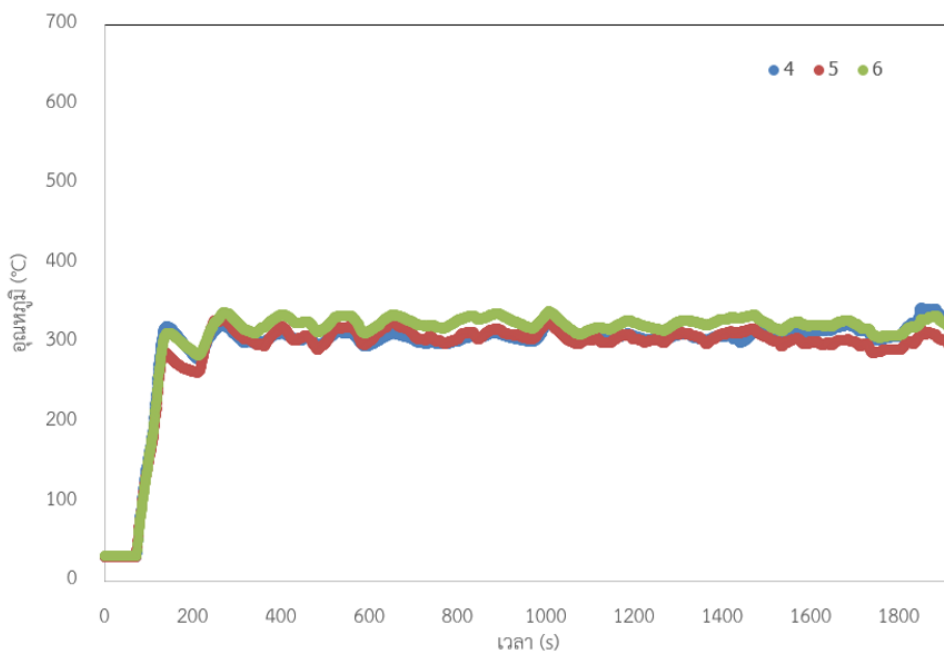
ดังนั้นพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ในการทอรีแฟคชั่น สำหรับที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้ 300 °C มีค่าเท่ากับ 16,950.33 MJ



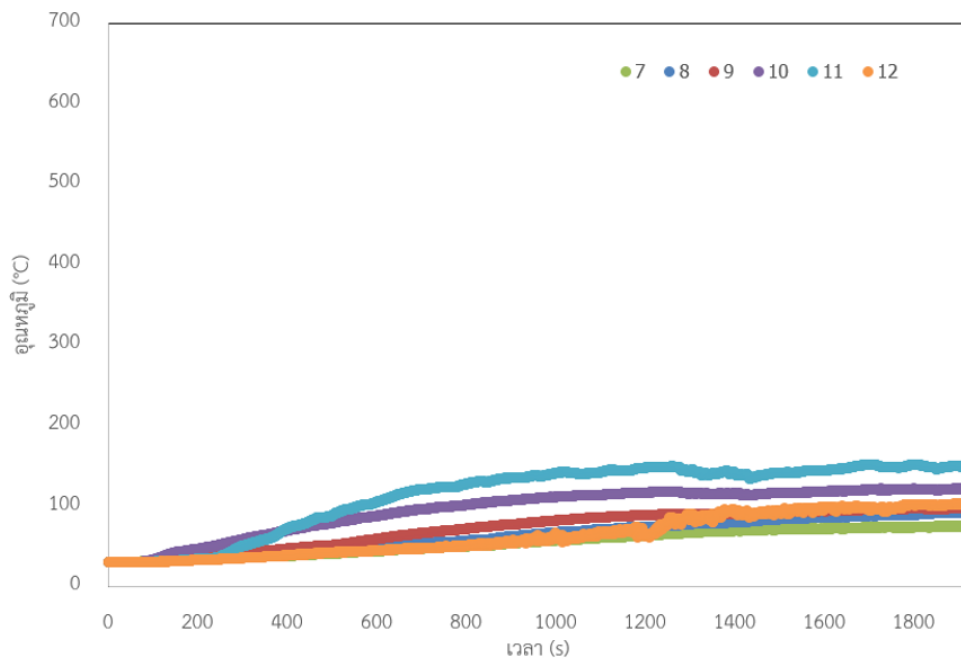
ค.1 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 300 องศาเซลเซียส



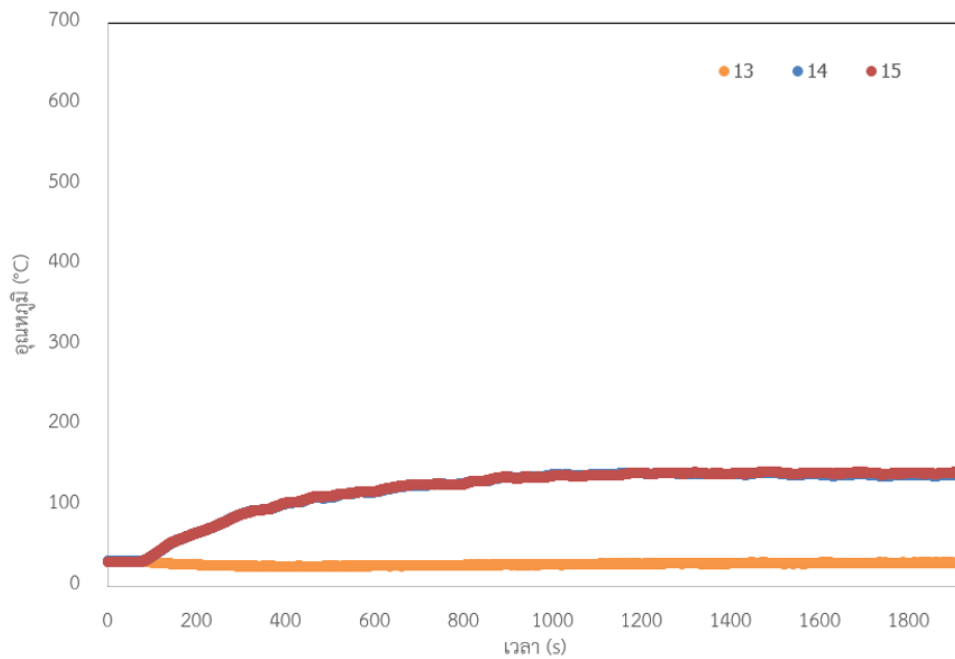
รูปภาพผนวก ค.1 แสดงการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟที่อุณหภูมิเผาไหม้ 300 องศาเซลเซียส



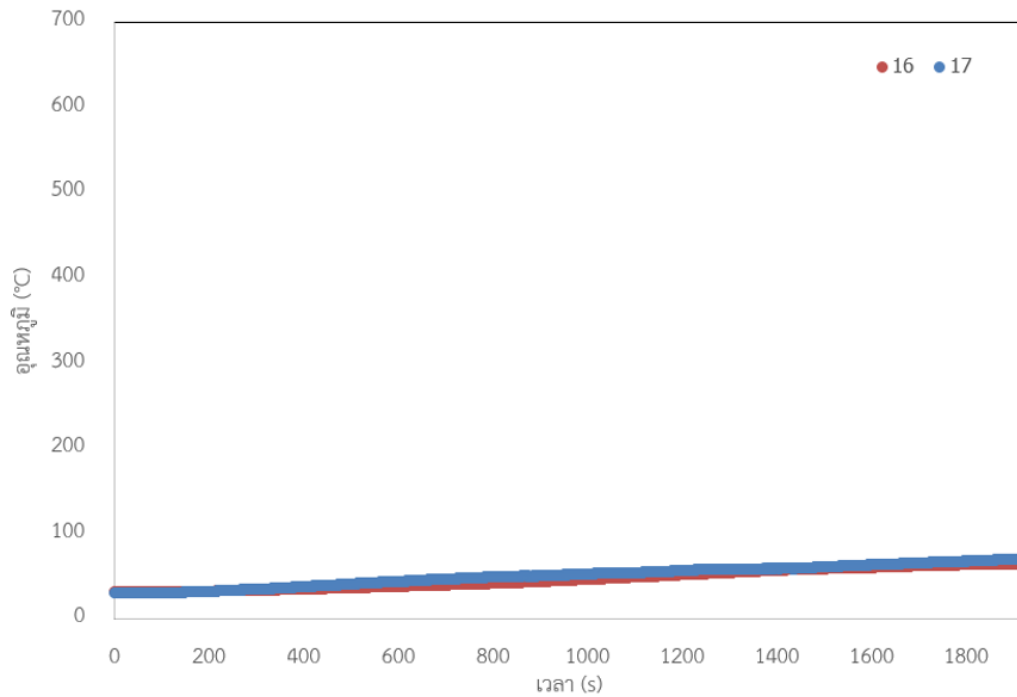
รูปภาพผนวก ค.2 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 300 องศาเซลเซียส



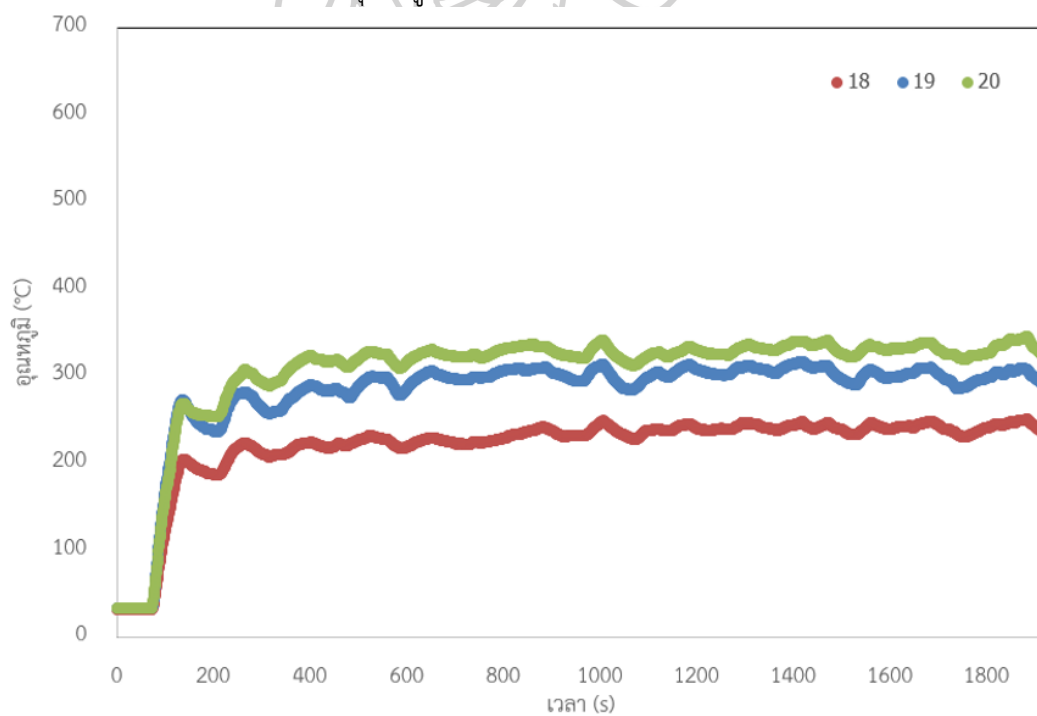
รูปภาพผนวก ค.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านนอกของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 300 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวปล่องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 300 องศาเซลเซียส

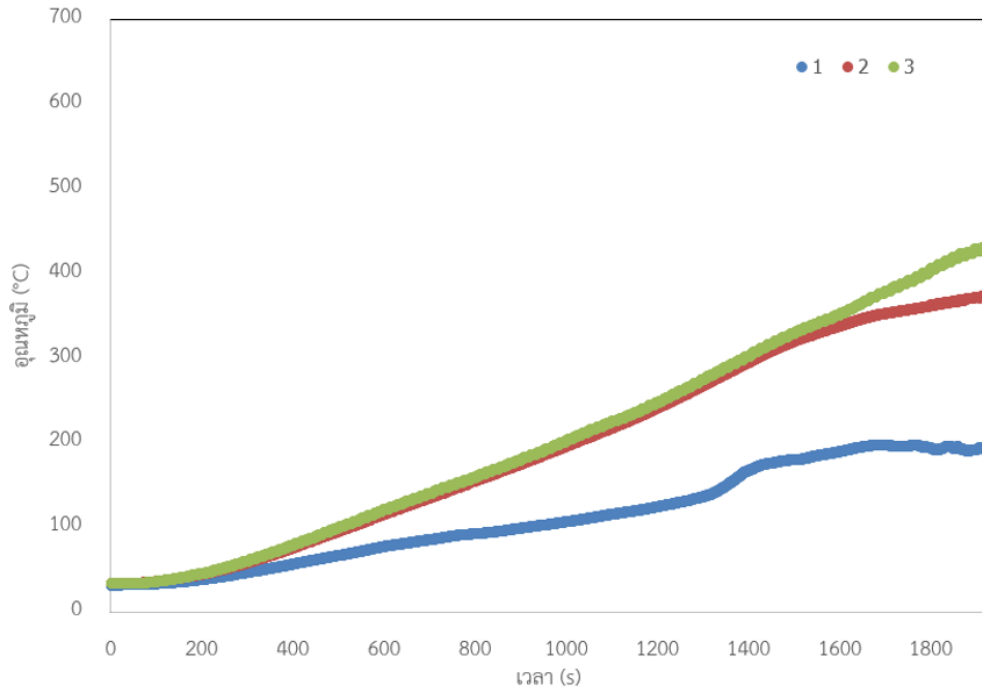


รูปภาพผนวก ค.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านหัวและท้ายของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 300 องศาเซลเซียส

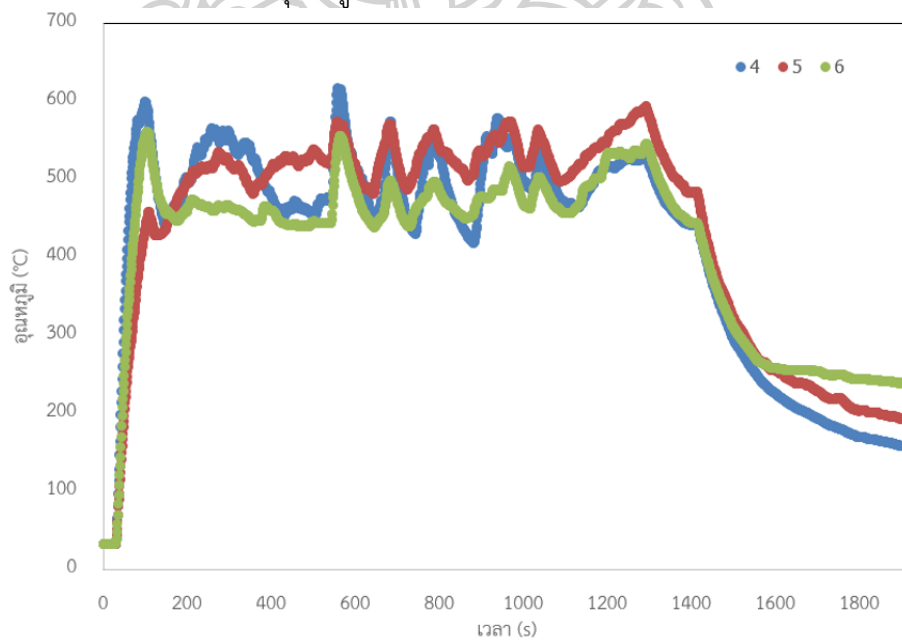


รูปภาพผนวก ค.6 แสดงการกระจายอุณหภูมิปากปล่องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 300 องศาเซลเซียส

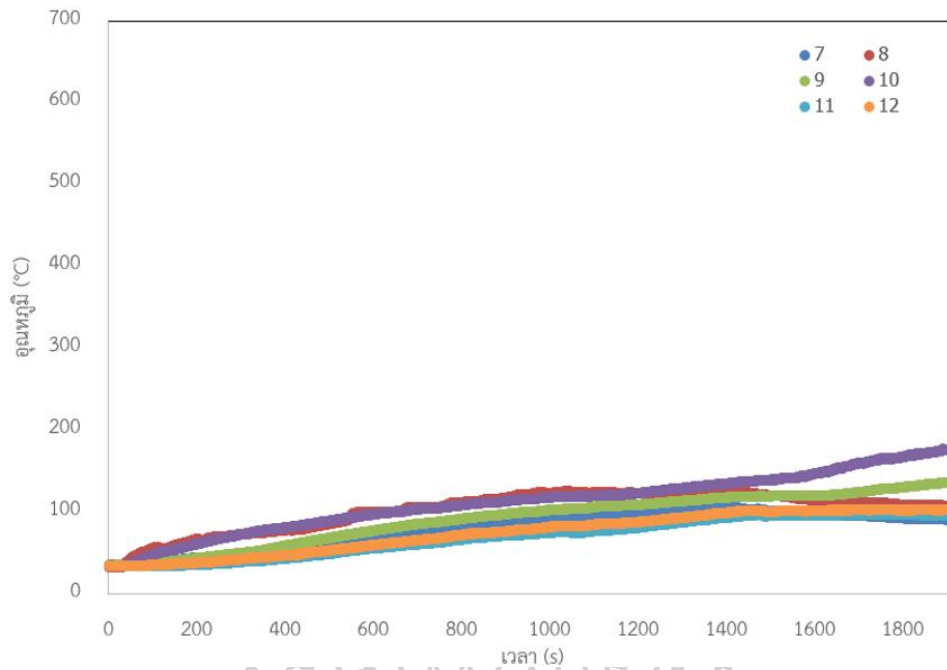
ค.2 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 500 องศาเซลเซียส



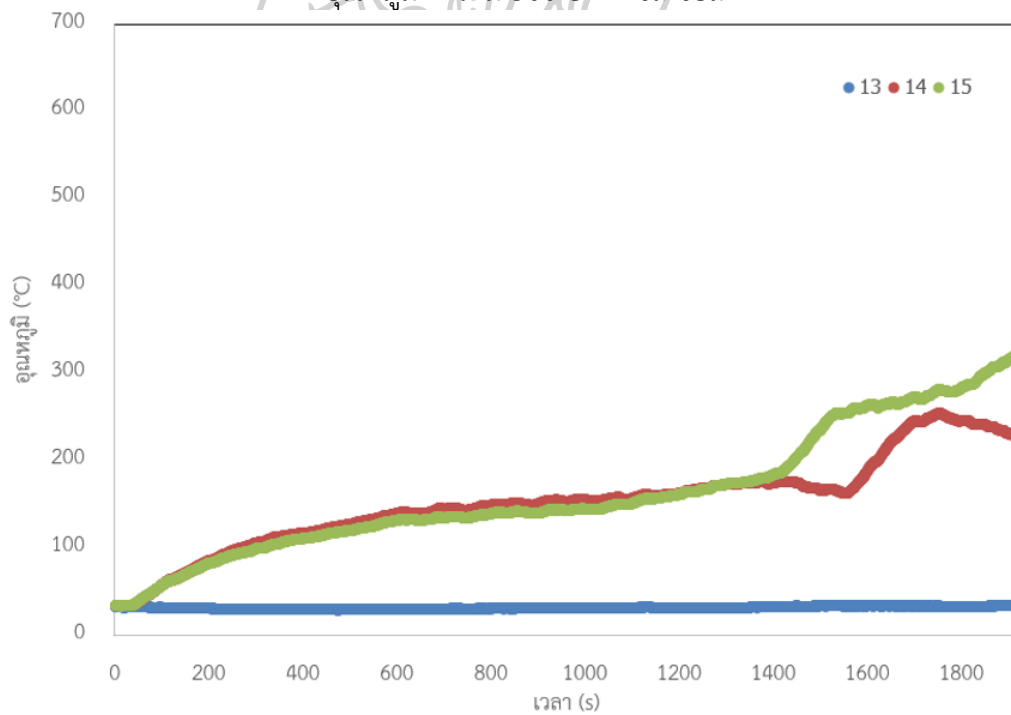
รูปภาพผนวก ค.7 แสดงการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟ  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 500 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค.8 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 500 องศาเซลเซียส

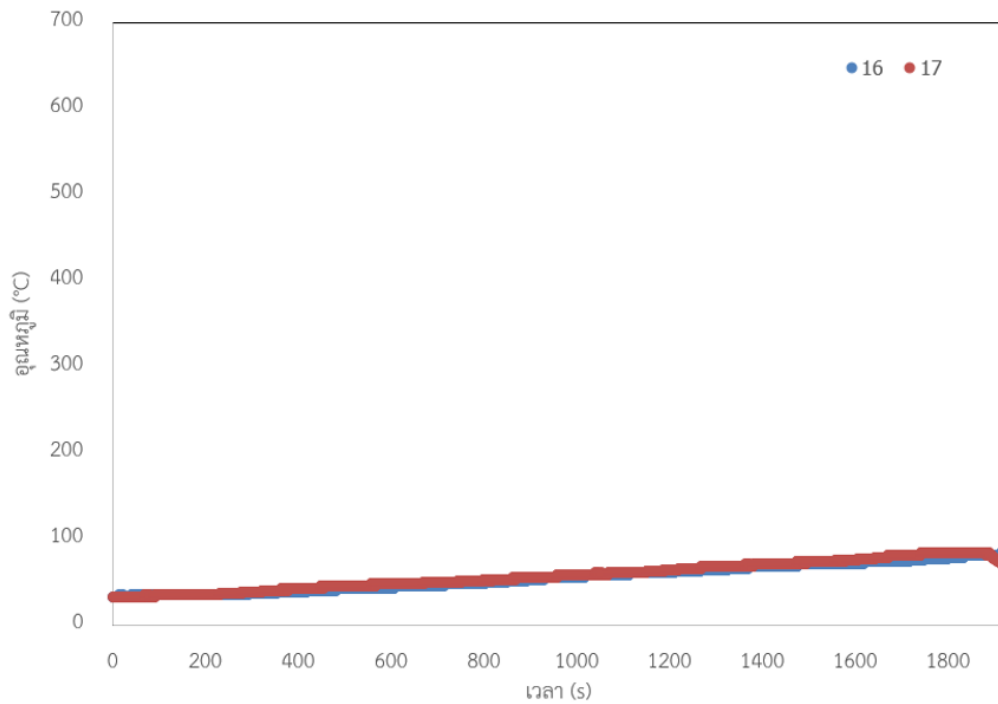


รูปภาพผนวก ค.9 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านนอกของเตาทอริแพคชั้นชนิดดรัมหมุ่น  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 500 องศาเซลเซียส

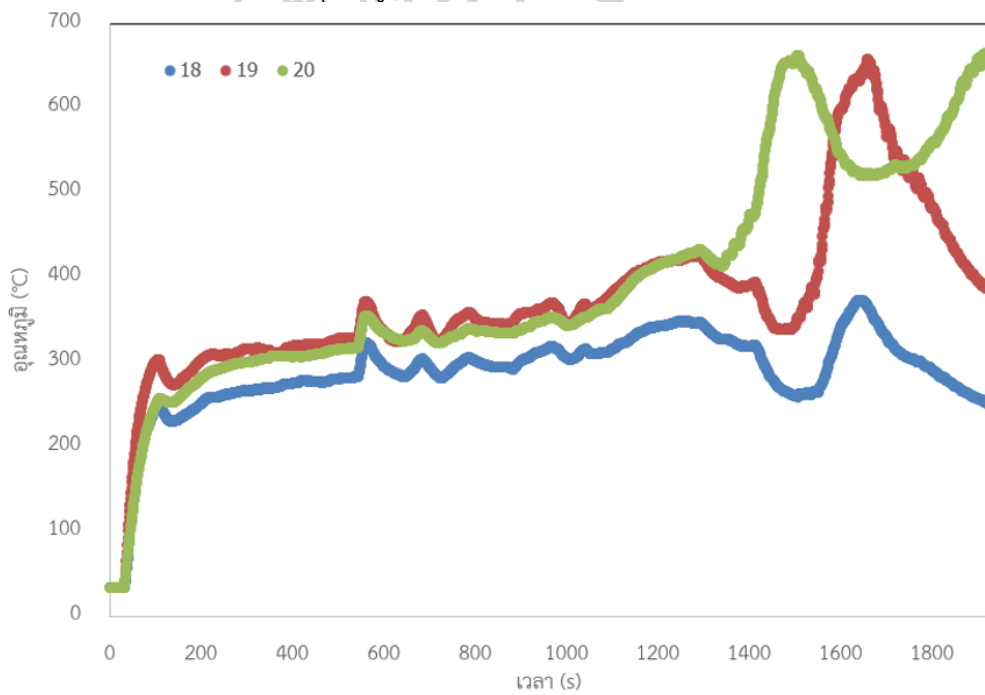


รูปภาพผนวก ค.10 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวปล่องของเตาทอริแพคชั้นชนิดดรัมหมุ่น  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 500 องศาเซลเซียส



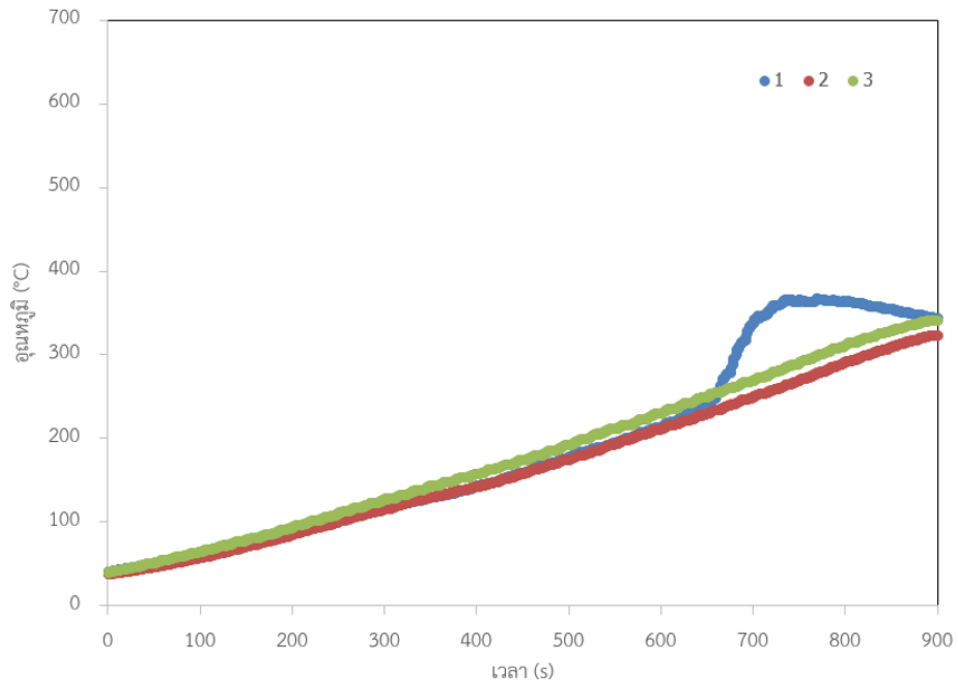


รูปภาพผนวก ค.11 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านหัวและท้ายของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุ่น  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 500 องศาเซลเซียส

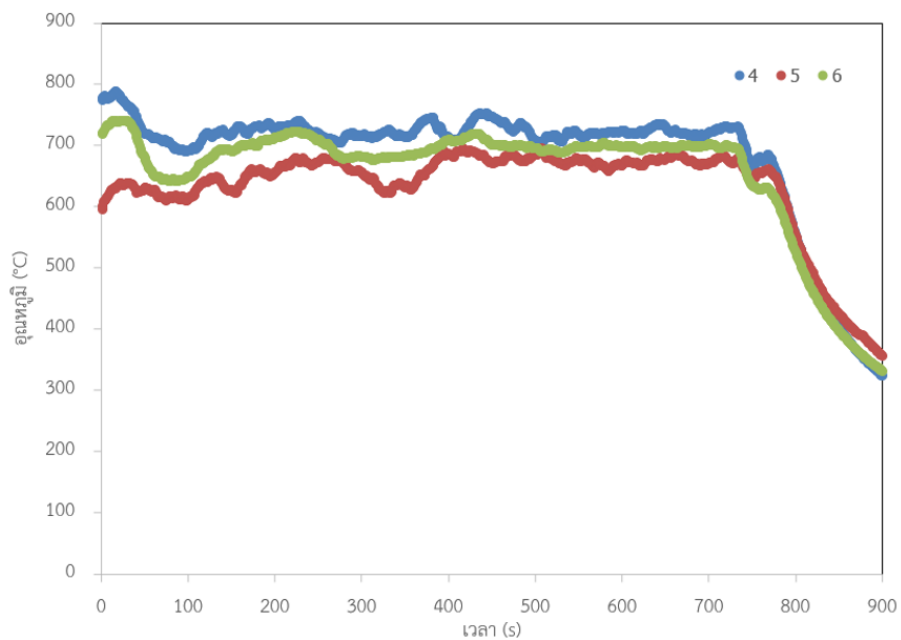


รูปภาพผนวก ค.12 แสดงการกระจายอุณหภูมิปากปล่องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุ่น  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 500 องศาเซลเซียส

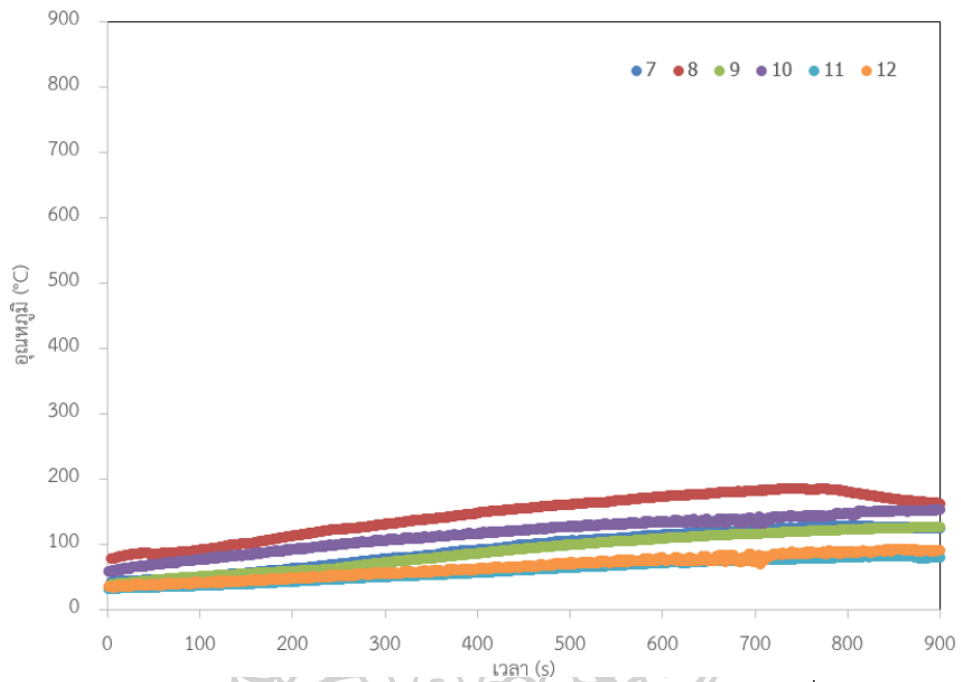
ค.3 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส



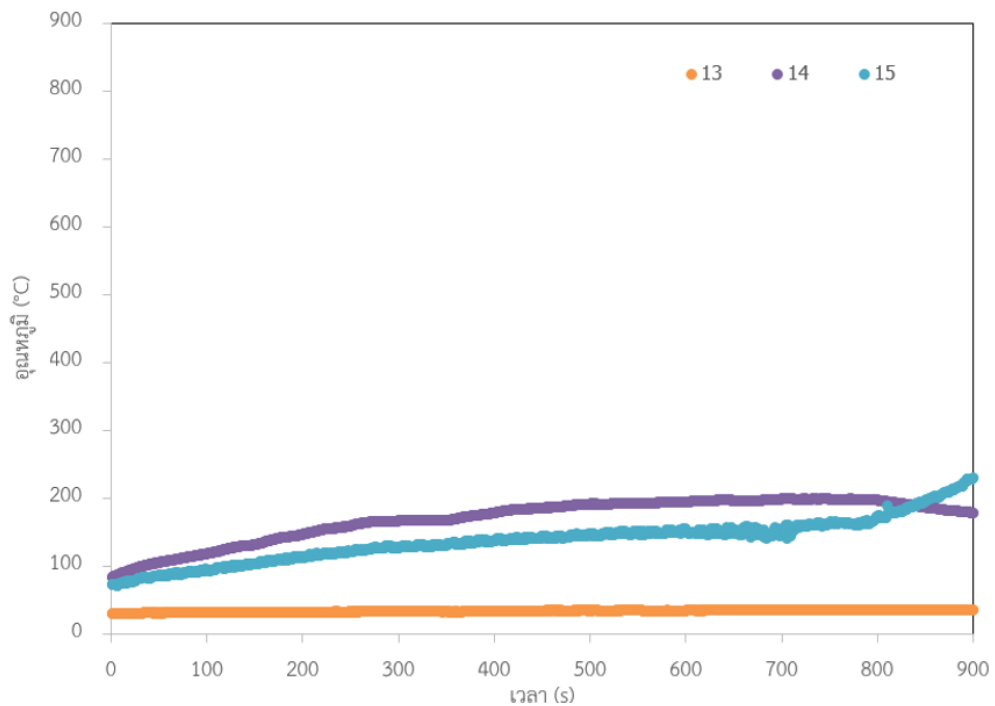
รูปภาพผนวก ค.13 แสดงการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟ  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส



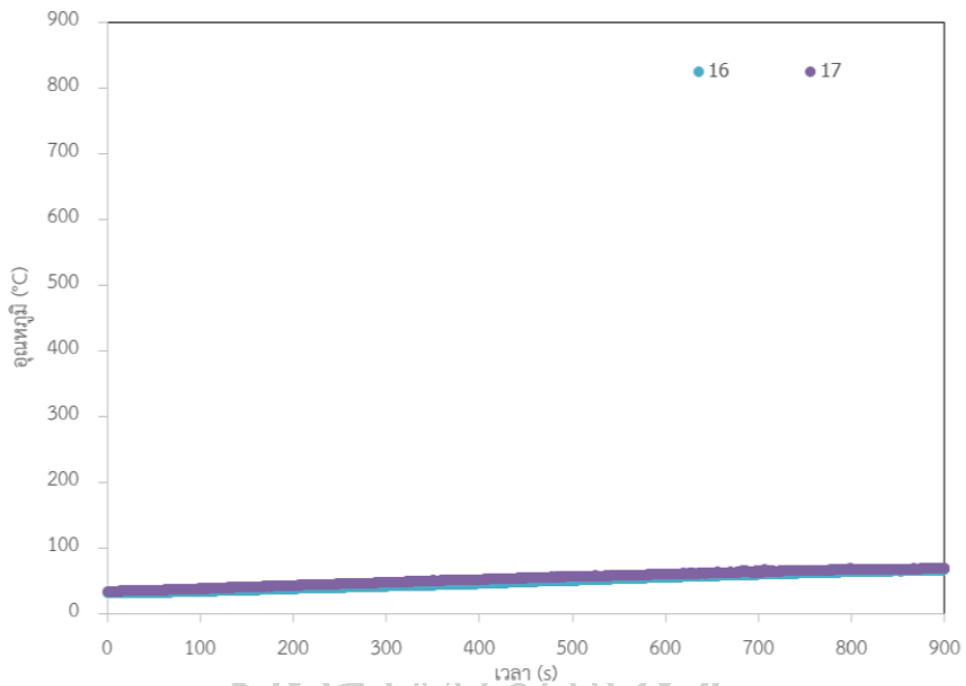
รูปภาพผนวก ค.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส



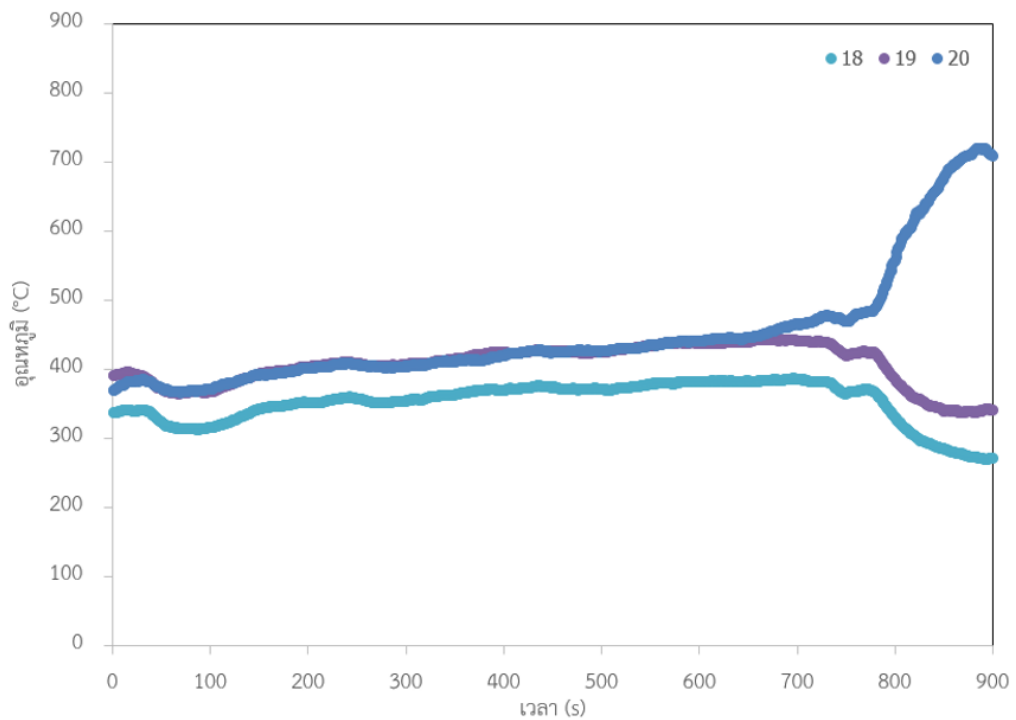
รูปภาพผนวก ค.15 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านนอกของเตาทอรีแพคชั้นชนิดรั่มหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค.16 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวปล่องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดรั่มหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส

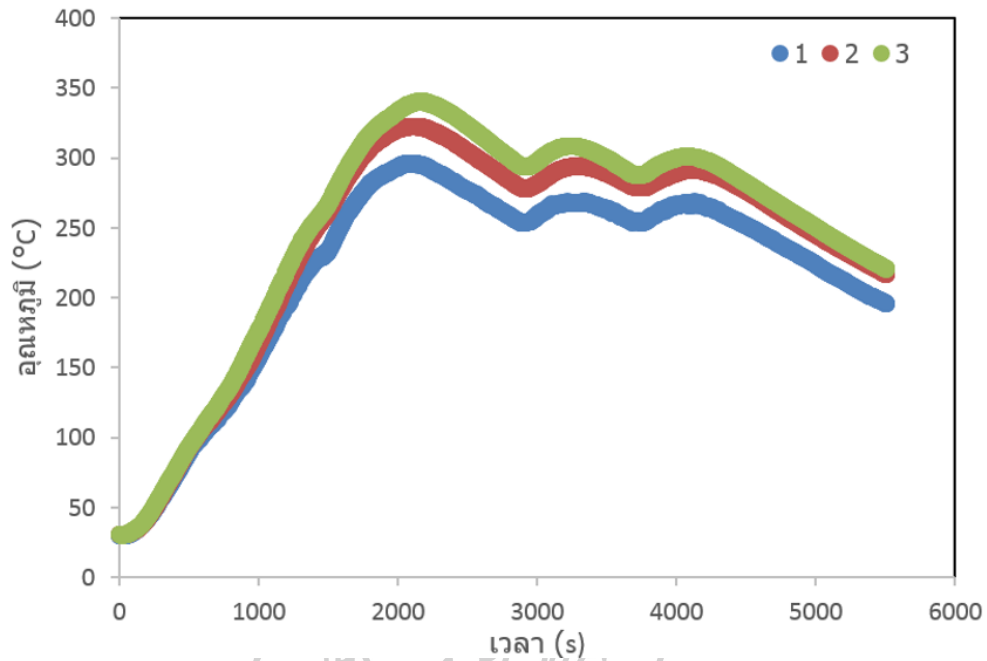


รูปภาพผนวก ค.17 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านหัวและท้ายของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส

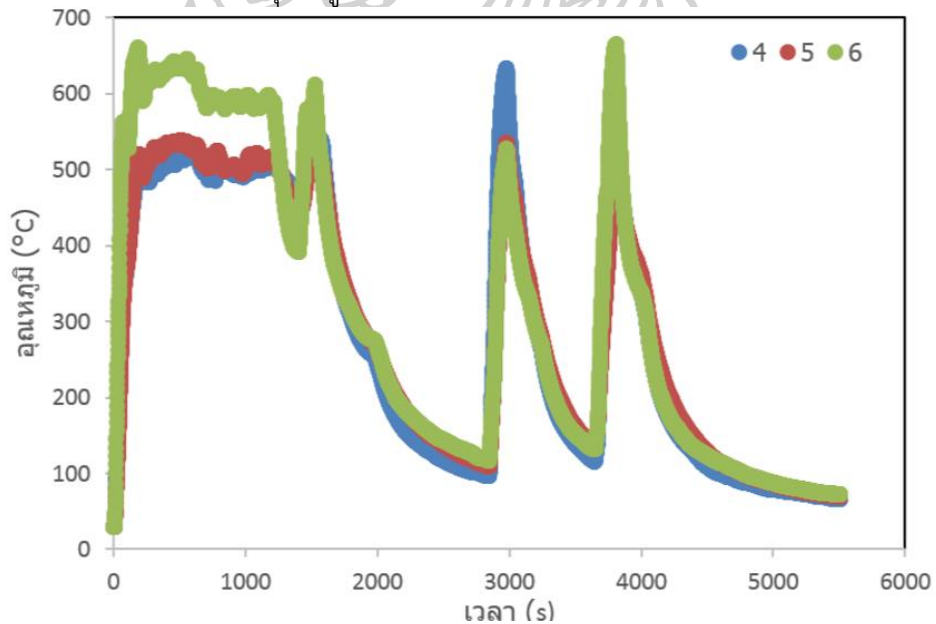


รูปภาพผนวก ค.18 แสดงการกระจายอุณหภูมิปากปล่องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส

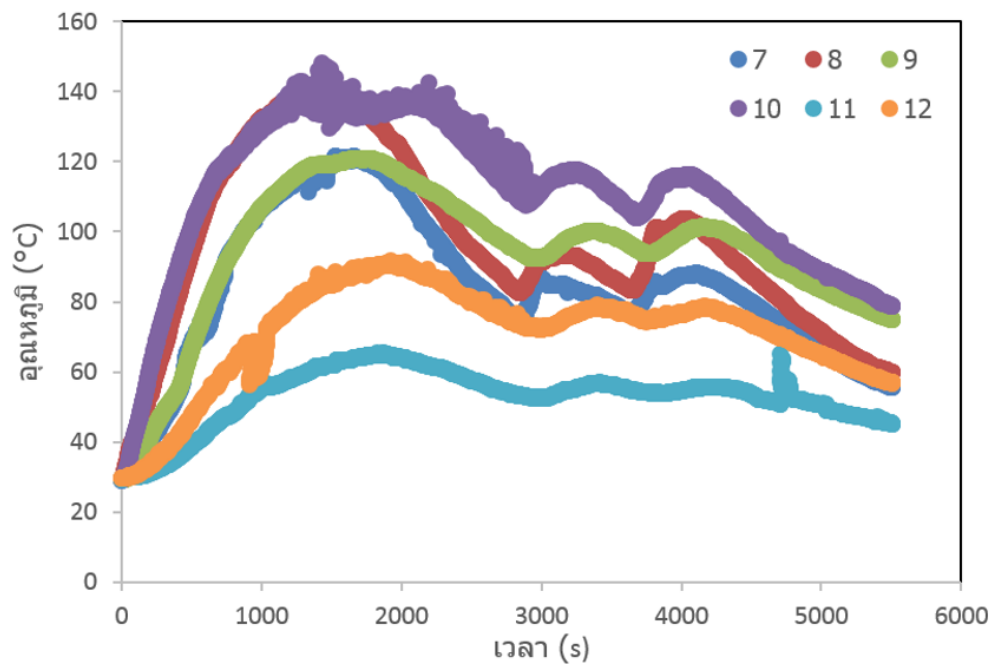
ค.4 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิการทอรีแฟคชั่น 220 องศาเซลเซียส



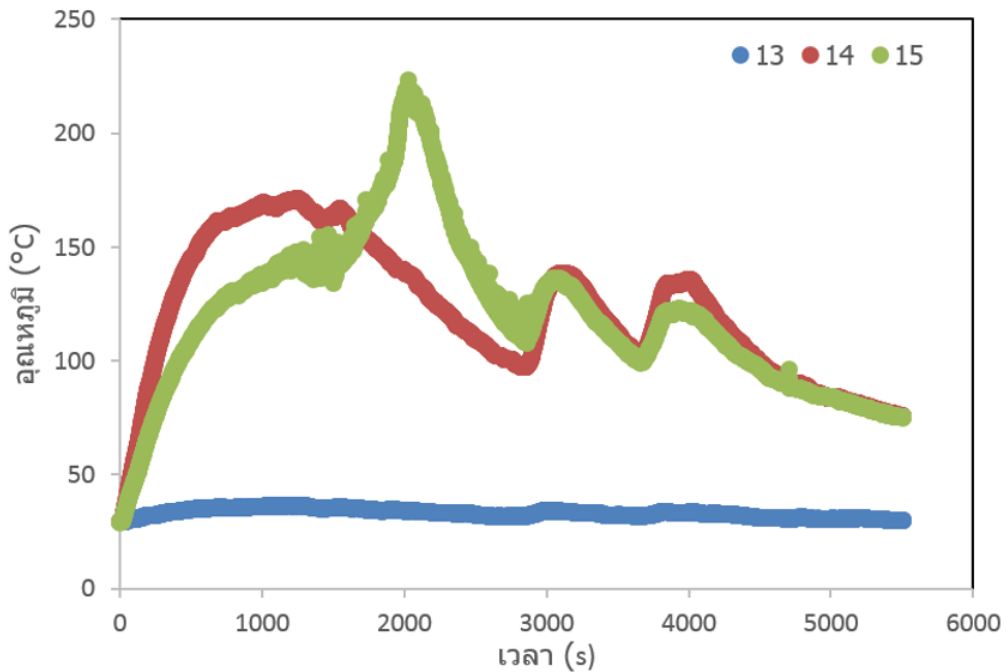
รูปภาพผนวก ค.19 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน ที่อุณหภูมิการทอรีแฟคชั่น 220 องศาเซลเซียส



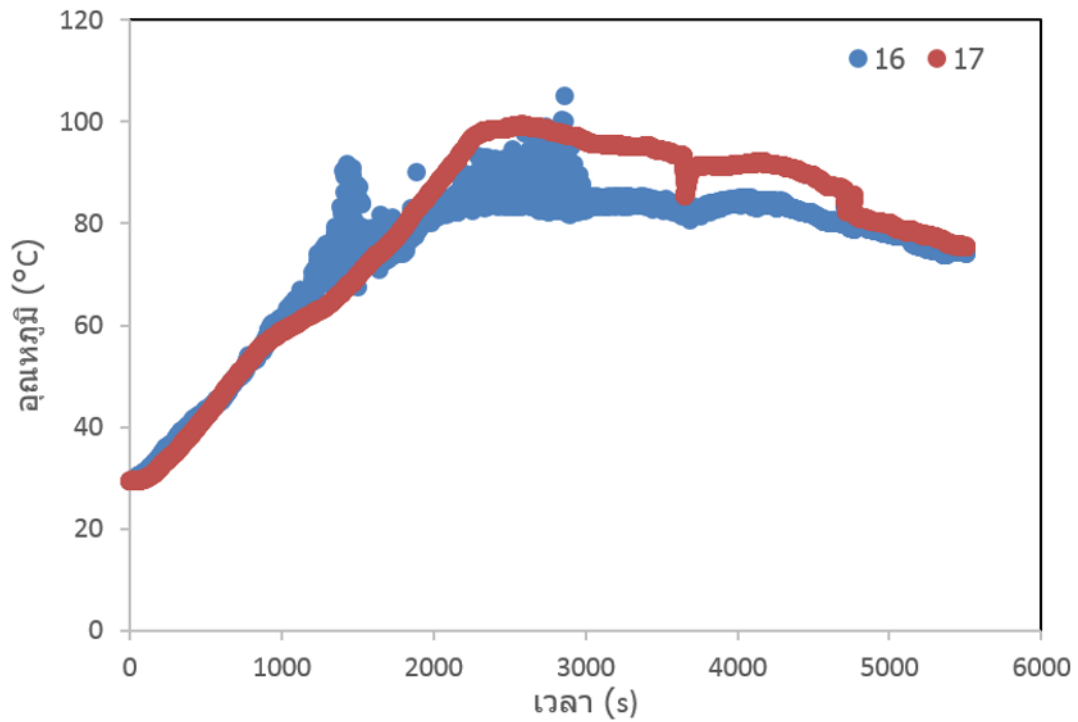
รูปภาพผนวก ค.20 แสดงการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟ ที่อุณหภูมิการทอรีแฟคชั่น 220 องศาเซลเซียส



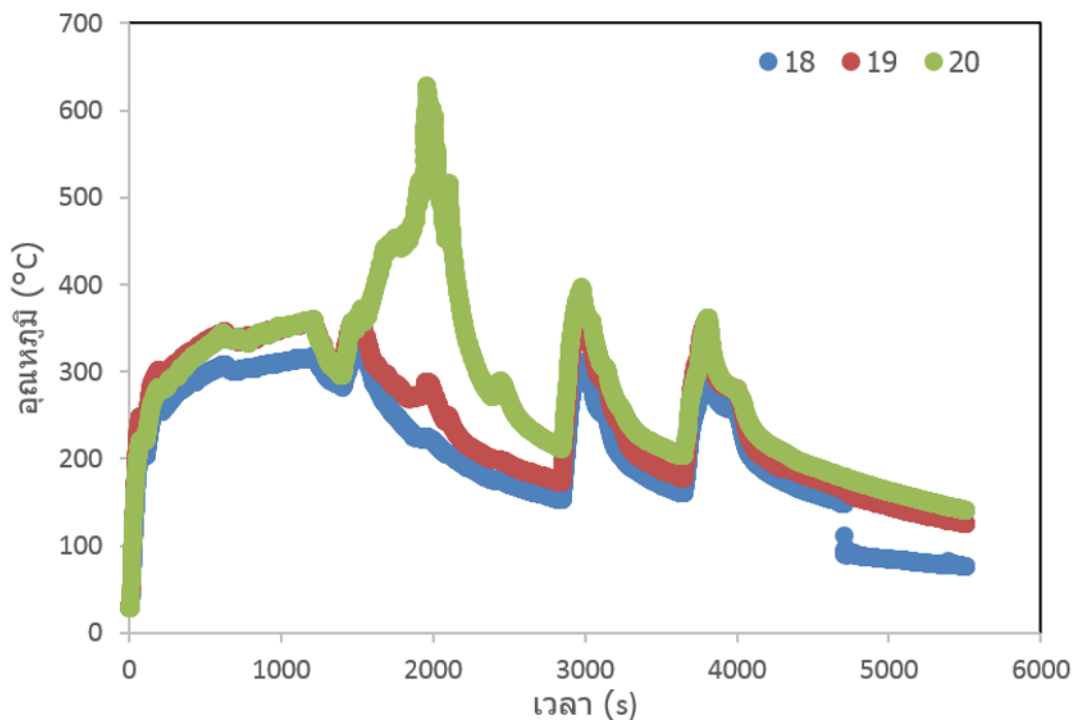
รูปภาพผนวก ค.21 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านนอกของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 220 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค.22 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวปล่องของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 220 องศาเซลเซียส

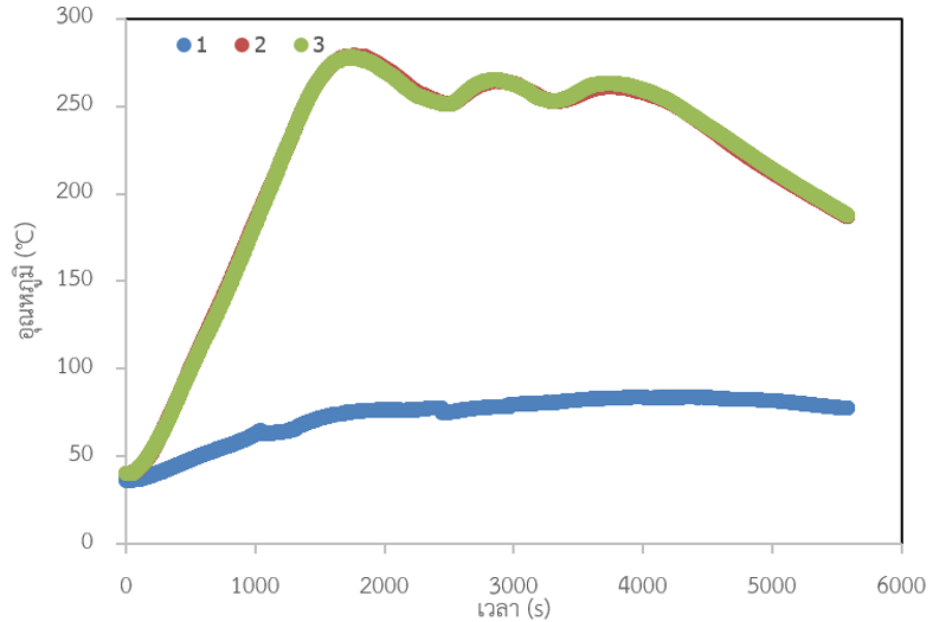


รูปภาพผนวก ค.23 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านหัวและท้ายของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 220 องศาเซลเซียส

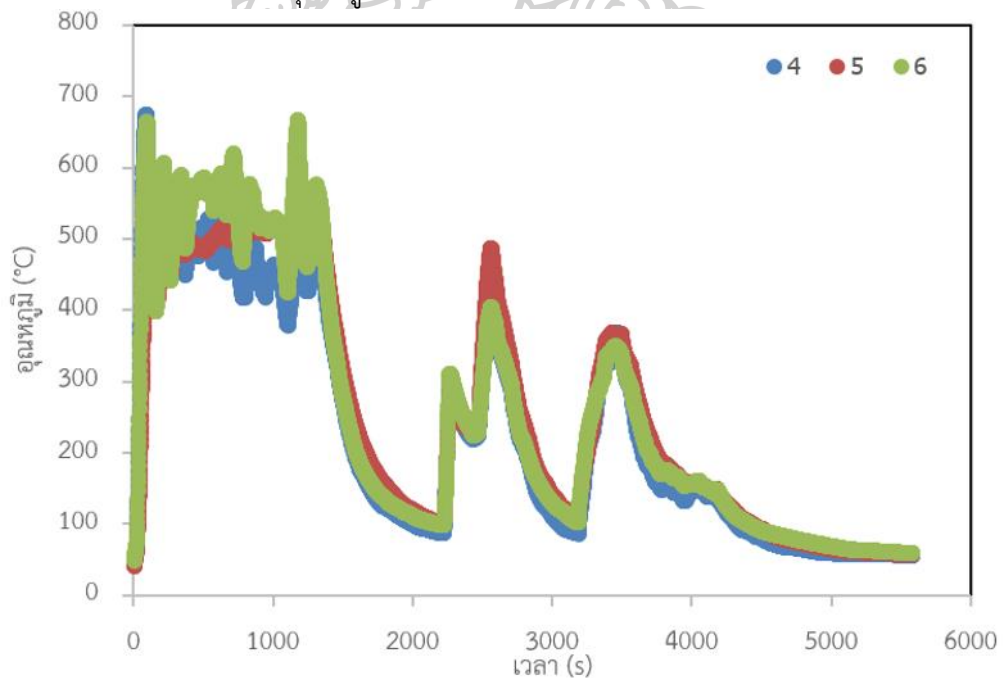


รูปภาพผนวก ค.24 แสดงการกระจายอุณหภูมิปากปล่องของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 220 องศาเซลเซียส

ค.5 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิการทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส

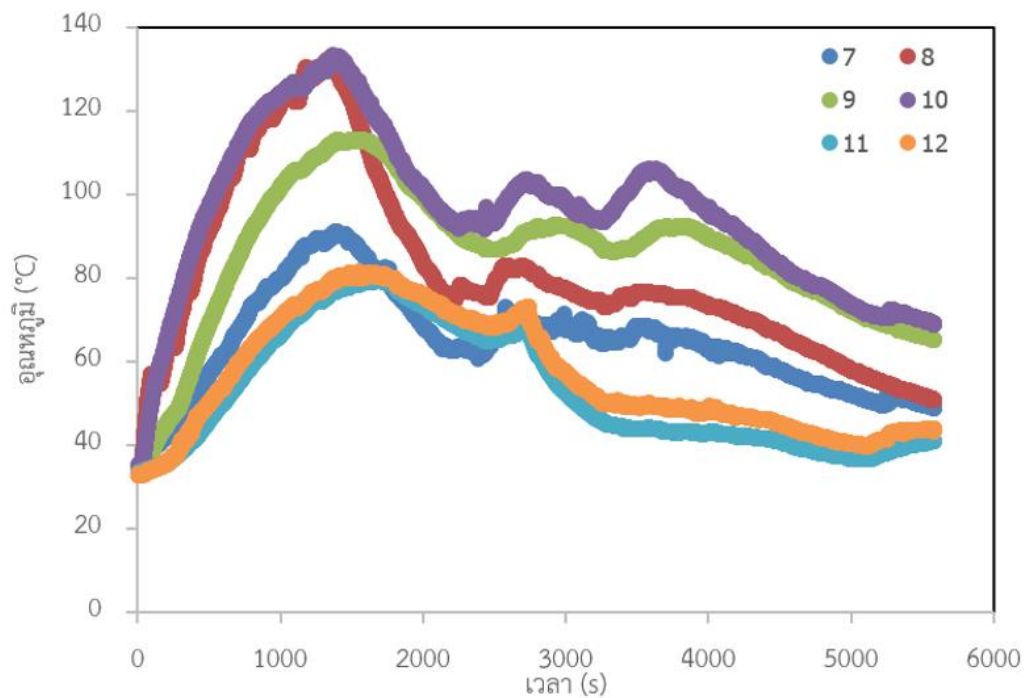


รูปภาพผนวก ค.25 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส

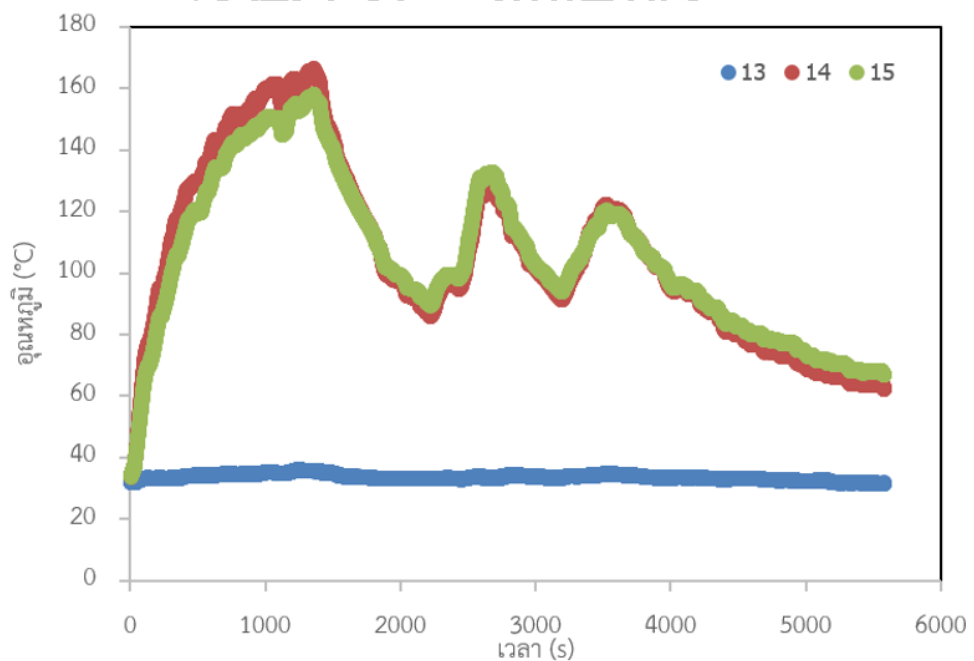


รูปภาพผนวก ค. 26 แสดงการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส

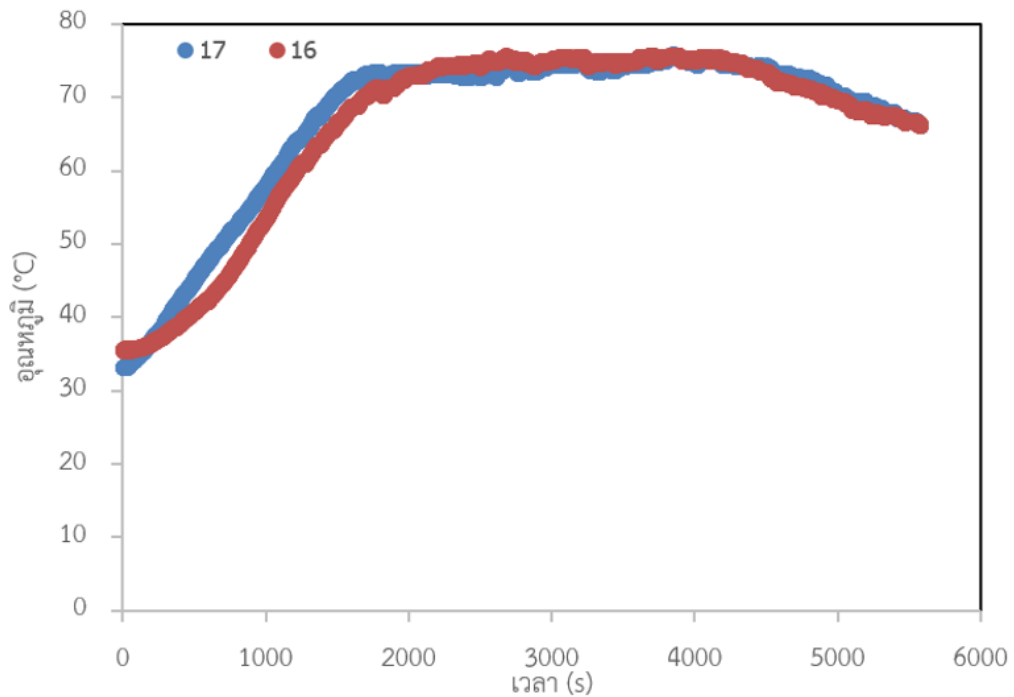




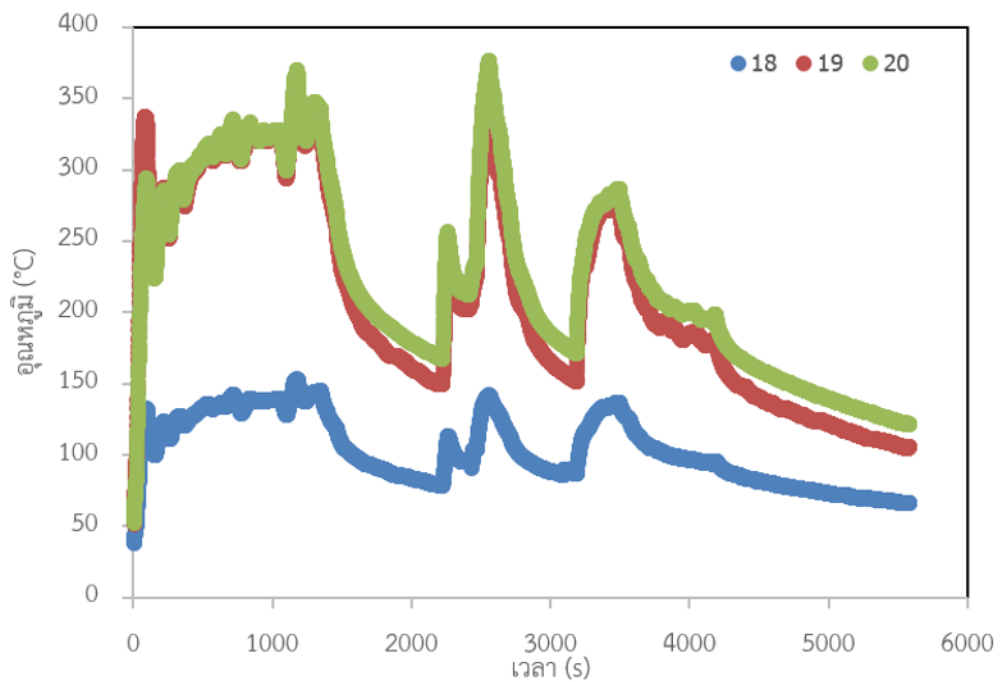
รูปภาพผนวก ค.27 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านนอกของเตาทอรีแพคชั้นชนิดรุ่มมน  
ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 250 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค.28 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวปล่องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดรุ่มมน  
ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 250 องศาเซลเซียส

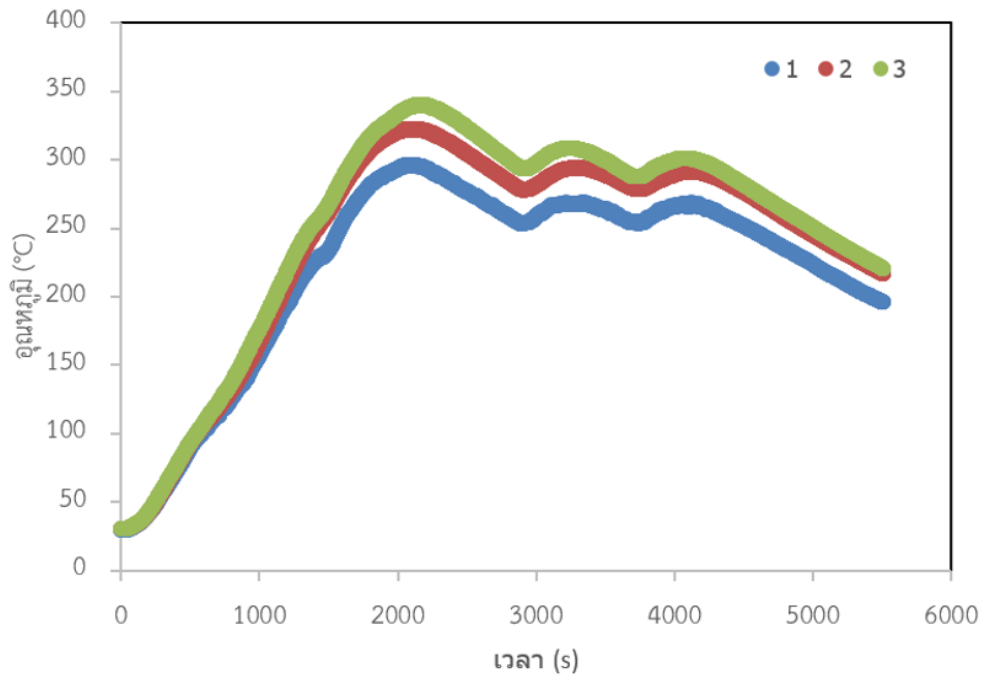


รูปภาพผนวก ค. 29 แสดงการกระจายอุณหภูมิมิวด้านหัวและท้ายของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส

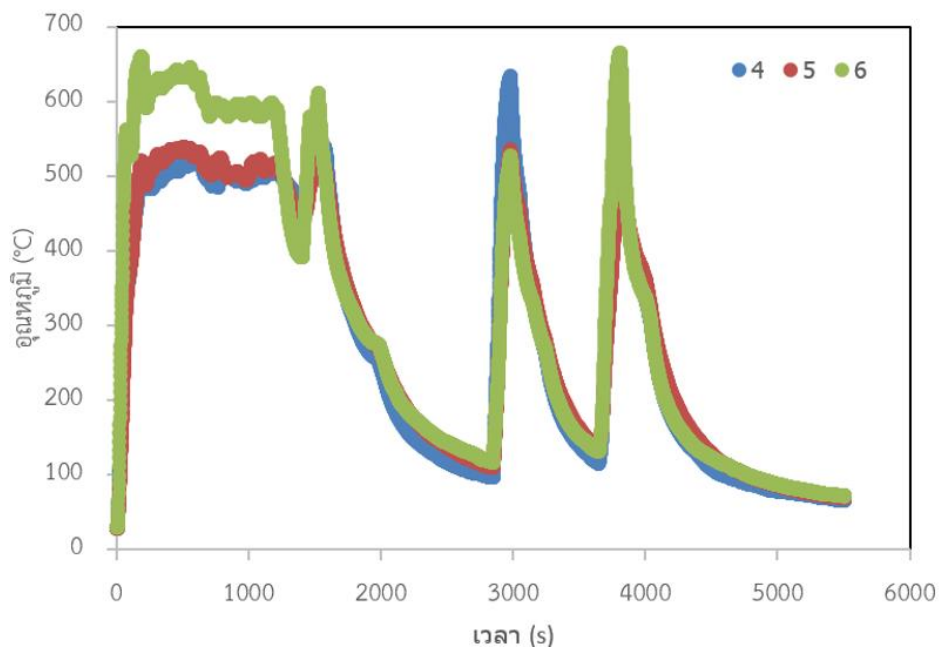


รูปภาพผนวก ค.30 แสดงการกระจายอุณหภูมิปากปล่องของเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 250 องศาเซลเซียส

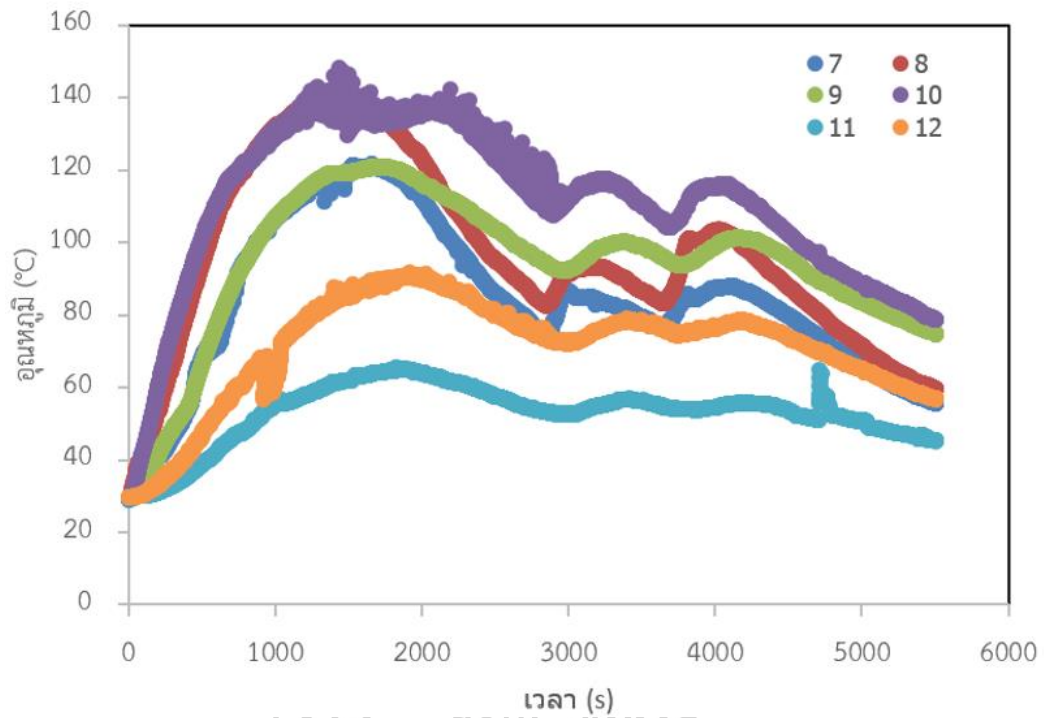
ค.6 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิการทอรีแฟคชั่น 280 องศาเซลเซียส



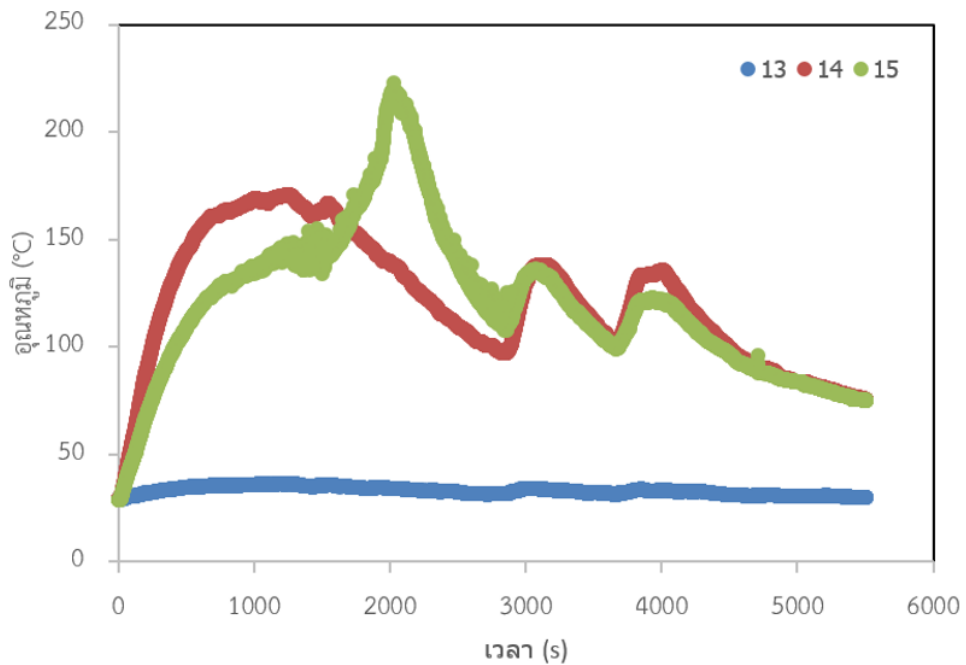
รูปภาพผนวก ค.31 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาทอรีแฟคชั่นชนิดดรัมหมุน ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 280 องศาเซลเซียส



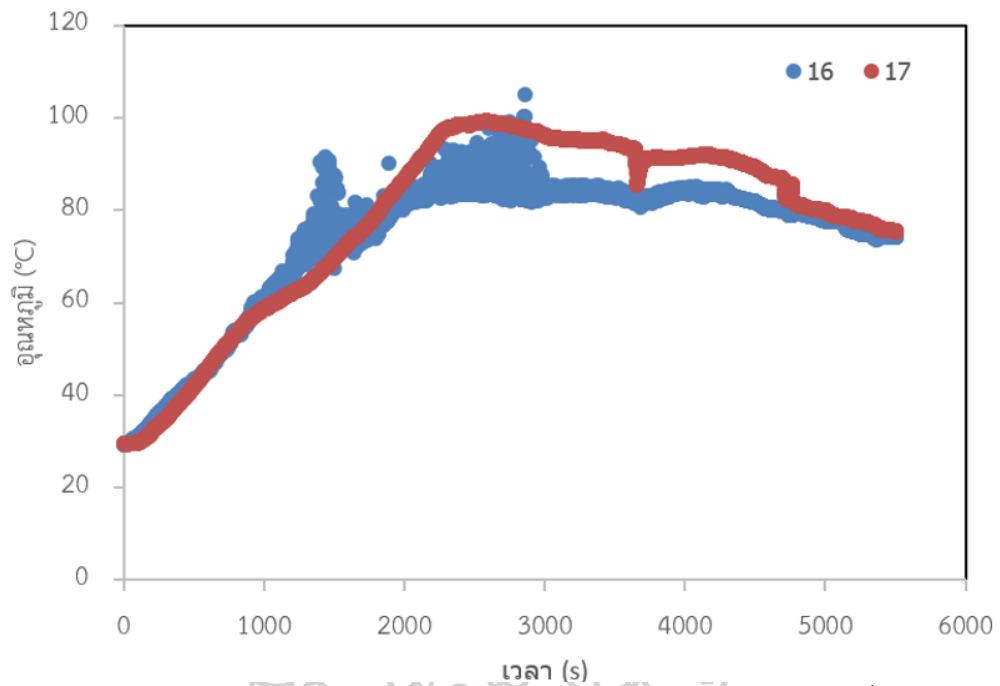
รูปภาพผนวก ค. 32 แสดงการกระจายอุณหภูมิเปลวไฟ ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 280 องศาเซลเซียส



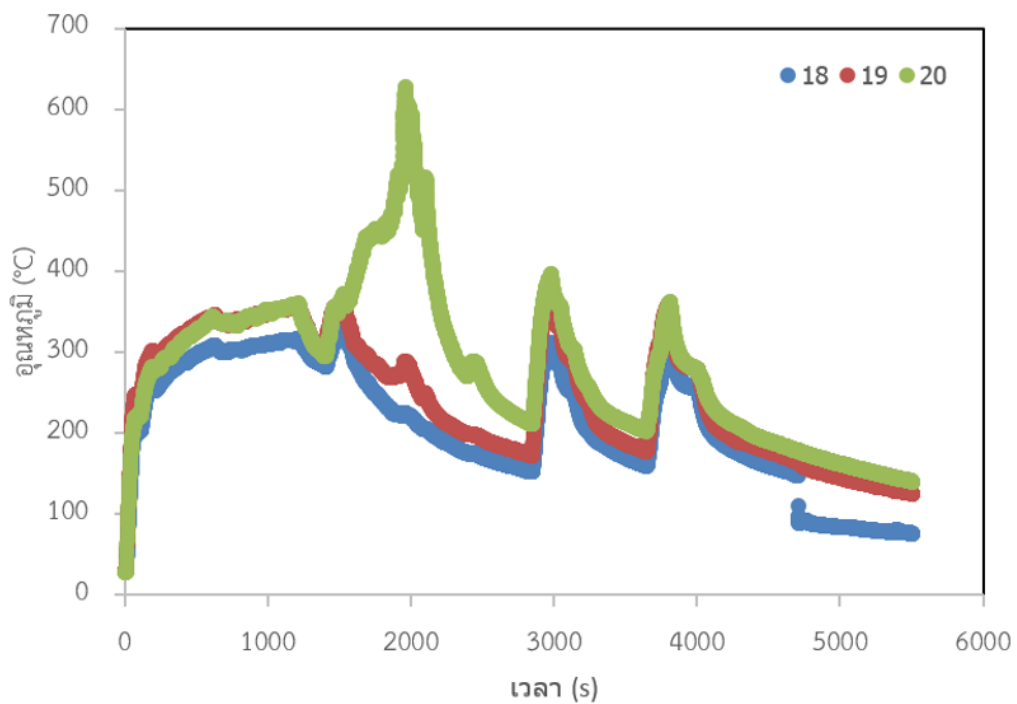
รูปภาพผนวก ค.33 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านนอกของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมูน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 280 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค.34 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวปล้องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมูน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 280 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค. 35 แสดงการกระจายอุณหภูมิผิวด้านหัวและท้ายของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 280 องศาเซลเซียส



รูปภาพผนวก ค.36 แสดงการกระจายอุณหภูมิปากปล่องของเตาทอรีแพคชั้นชนิดดรัมหมุน  
ที่อุณหภูมิเผาไหม้ 280 องศาเซลเซียส

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศรัณย์ ทรัพย์สันฐิติกุล
วัน เดือน ปี เกิด	1/5/2499
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2549 วิทยาศาสตรบัณฑิต เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม พ.ศ. 2556 ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	100/7 ถนนเพชรเกษม บางแค อำเภอบางแค กรุงเทพมหานคร 10160

