

กระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ: อิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันและ
จลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงาน

TORREFACTION OF SPENT COFFEE GROUND:
EFFECT OF TORREFACTION TEMPERATURE AND
KINETICS OF ENERGY PROPERTIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2565

KMITL-2022-EN-M-100-093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TORREFACTION OF SPENT COFFEE GROUND:
EFFECT OF TORREFACTION TEMPERATURE AND
KINETICS OF ENERGY PROPERTIES

NATTHANANT BANGKHA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
OF MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LAKRABANG
2022
KMITL-2022-EN-M-100-093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการทอรีแฟคชั่นกากกาแฟ: อิทธิพลของอุณหภูมิ ทอรีแฟคชั่นและจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงาน
นักศึกษา	นางสาวณัฐนันท์ บางคำ
รหัสประจำตัว	61601193
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.วันพุทธ แซ่ฉั่ว

บทคัดย่อ

กากกาแฟมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตาม กากกาแฟที่เหลือทิ้งมีความชื้นสูง (66%ฐานเปียก) จำเป็นต้องลดความชื้นก่อนนำไปผลิตชีวมวล กระบวนการทอรีแฟคชั่นจึงน่าจะเป็นกระบวนการเตรียมชีวมวลที่เหมาะสมเพื่อลดความชื้นพร้อมทั้งปรับปรุงคุณภาพชีวมวลให้มีสมบัติเชิงพลังงานที่ดีขึ้น กระบวนการทอรีแฟคชั่นเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่ช่วยแปรสภาพชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแข็ง โดยหลักการประกอบไปด้วยการใช้ความร้อนเผาไหม้ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือออกซิเจนจำกัดที่ความดันบรรยากาศเพื่อสลายองค์ประกอบภายในของชีวมวล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่อคุณสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ และเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชั่นกากกาแฟ โดยใช้อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 4 ระดับ คือ 200, 250, 300 และ 350 °C เป็นเวลา 30 min ที่อัตราการให้ความร้อน 5 °C/min จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น วิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานประกอบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร, การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ, ค่าความร้อนสูง Solid yield, Enhancement factor และ Energy yield พบว่าอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นมีผลต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าความร้อนสูง และ Enhancement factor มีค่าสูงสุดเมื่อทำกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิสูง 350 °C แต่ที่อุณหภูมินี้ ค่า Solid yield และ Enhancement factor มีค่าต่ำสุด จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นและสมบัติเชิงพลังงานทุกตัวเกินกว่า 0.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ไปในทิศทางเดียวกันของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นและสมบัติเชิงพลังงาน การสร้างแบบจำลองการทำนายระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นกับค่าความร้อนสูงและ Energy yield โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.9 สำหรับการศึกษาการ

เปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงพลังงานจากอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 4 ระดับ (200, 250, 300 และ 350 °C) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่ใช่อะไรที่ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้แต่ง

350°C) และเวลาของกระบวนการ 6 ระดับ (10, 20, 30, 40, 50 และ 60 min) นอกจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ ยังมีการวิเคราะห์การสูญเสียมวลขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชัน (Weight loss dynamic of torrefaction) และดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction severity index, TSI) ด้วย ที่อุณหภูมิต่ำ 200°C สมบัติเชิงพลังงานแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกเวลาของกระบวนการ แต่ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงพลังงานยิ่งมากขึ้นและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ค่าสัดส่วน H/C และ O/C ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันลดลงและแสดงถึงคุณสมบัติที่เข้าใกล้ถ่านหินมากขึ้น ค่าดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟลดลงอย่างมากตามอุณหภูมิทอรีแฟคชันและเวลาของกระบวนการที่ลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นเหมาะสมกว่ากระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิต่ำระยะเวลานาน โดยกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟสามารถอธิบายเชิงจลนพลศาสตร์ได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชันแบบไอโซเทอร์มัล ผลการวิเคราะห์พบว่า เป็นกระบวนการอันดับปฏิกิริยา 4 มีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.94 kJ/mol และค่า pre-exponential factor เท่ากับ และ 33,289.59 min⁻¹ โดยมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากงานวิจัยนี้สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟคือ 350°C 40 min

Thesis	Torrefaction of Spent Coffee Ground: Effect of Torrefaction Temperature and Kinetics of Energy Properties
Student	Miss Natthanant Bangkha
Student ID.	61601193
Degree	Master of Engineering
Program	Agriculture Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Wanphut Saechua

Abstract

Spent coffee ground (SCG) contains high fixed carbon content and high heating value which is considered as a good source of an alternative energy. However, SCG has high moisture content (66%wet basis) and needs to be dehumidified before being used for biomass production. Torrefaction process therefore seems to be a suitable biomass preparation process to reduce moisture content and improve energy properties of the biomass. Torrefaction process is a thermochemical process that converts biomass into solid fuels. The principle of torrefaction consists in using heat combustion in an oxygen-free or oxygen-limited atmosphere at atmospheric pressure to break down the internal constituents of the biomass. The objectives of this research were to investigate the effect of torrefaction temperature on energy properties of SCG and to study the kinetics of energy properties of SCG during the torrefaction process. Four torrefaction temperatures including 200, 250, 300 and 350°C were used with a torrefaction duration of 30 min at a heating rate of 5°C/min to obtain the torrefied SCG. Energy properties consisting of proximate analysis, ultimate analysis, high heating value, solid yield, enhancement factor and energy yield were analyzed. The torrefaction temperature had a significant effect on the energy properties of SCG with a confidence level of 95%. High heating value and enhancement factor were the highest when SCG was torrefied

at the highest temperature of 350°C. However, at this temperature, solid and energy yields were the lowest. From the correlation analysis, the correlation coefficient between the torrefaction temperature and all energy properties was greater than 0.9. A prediction model was created between torrefaction temperature and high heating value and energy yield, giving a coefficient of determination greater than 0.9. In objective 2, the changes in energy properties were investigated under the effects of four torrefaction temperatures (200, 250, 300 and 350°C) and six process durations (10, 20, 30, 40, 50 and 60 min). In addition to analyzing the energy properties of SCG, weight loss dynamic of torrefaction and severity index (TSI) of torrefaction were also analyzed. At a low temperature of 200°C, the energy properties hardly changed at any time of the process. But at higher temperatures, the change in energy properties was greater and differed statistically from the untreated SCG. The H/C and O/C ratios of the torrefied SCG decreased and showed the properties closer to coal. The severity index of the SCG torrefaction process decreased significantly with the torrefaction temperature and processing time. This indicates that a short-term high-temperature torrefaction process is more suitable than a long-term low-temperature process. The SCG torrefaction process can be described by the kinetic model of the isothermal torrefaction process. The reaction order of four was obtained with the activation energy of 0.94 kJ/mol and pre-exponential factor of 33,289.59 min⁻¹. The optimum condition from this research for SCG torrefaction process is 350°C 40 min.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยความอนุเคราะห์จากบริษัท เขาช่องอุตสาหกรรม 1979 จำกัด ที่เอื้อเพื่อตัวอย่างภาคการศึกษาศึกษา และงบประมาณสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.วันพุธ แซ่ฉั่ว ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ พร้อมทั้งแนะนำและชี้แนะแนวทางงานวิจัยสำเร็จลุล่วง นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้ คำชี้แนะ และข้อคิดเห็นต่างๆแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบิดามารดาผู้สนับสนุนทางการศึกษา ขอขอบคุณสามีและลูกสาวที่เป็นแรงใจและแรงผลักดัน ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องที่สนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือจนผู้วิจัยบรรลุเป้าหมาย

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา ครอบครัวอาจารย์ที่ปรึกษา และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐนันท์ บางคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ชีวมวล	3
2.2 กากกาแฟ	4
2.3 กระบวนการทอรีแฟคชัน	5
2.4 คุณสมบัติของชีวมวลและการวิเคราะห์คุณสมบัติ	7
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	12
3.1 กากกาแฟและการเตรียมตัวอย่าง	12
3.2 กระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ	13
3.3 การทดลอง	15
3.4 การวิเคราะห์ความชื้น	16
3.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ	17
3.6 ดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction severity index, TSI)	22
3.7 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชัน	22

บทที่ 4	ผลการทดลอง	25
4.1	สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	25
4.2	อิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ	27
4.3	จลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชั่น กากกาแฟ	33
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	46
5.1	การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่อสมบัติเชิงพลังงานของ กากกาแฟ	46
5.2	การศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการ ทอรีแฟคชั่นกากกาแฟ	46
5.3	ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง		48
ภาคผนวก		53
ประวัตินักวิจัย		62



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ค่าความร้อนและความชื้นของชีวมวล	4
3.1	รายการคุณสมบัติและวิธีการวิเคราะห์ Ultimate Analysis ของกากกาแฟ	18
4.1	สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	26
4.2	Pearson's correlation coefficients ในแต่ละค่าพารามิเตอร์	31
4.3	สรุปคุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด	35
4.4	ผลวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าสัดส่วน H/C และ O/C ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 min	39
4.5	ค่าการลดลงของมวลที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระบวนการแฟคชั่นที่สถานะหนึ่ง (ΔWI) Solid yield และค่าดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชั่น	42
4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชั่นกากกาแฟ	44
4.7	สมบัติของจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชั่นกากกาแฟ	44

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	Van Krevelen diagram	6
3.1	กากกาแฟก่อนเตรียมตัวอย่างมีขนาดอยู่ระหว่าง 2.36 mm ถึง 75 μm	12
3.2	กากกาแฟหลังเตรียมตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่า 425 μm	13
3.3	กระบวนการทอรีแฟคชั่น	14
3.4	กราฟแสดงอุณหภูมิ – เวลา ของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 200°C ระยะเวลา 30 min	15
3.5	เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TG209F3 Tarsus, Netzsch, Germany)	17
3.6	TG curve ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (ตัวอย่างควบคุม)	18
3.7	เครื่อง Bomb Calorimeter (C200, IKA, Germany)	19
3.8	ตัวอย่างกากกาแฟอัดเม็ด	20
3.9	แสดงส่วนประกอบ vessel	20
3.10	แสดงการสวม Ignition adapter ลงด้านบนของ vessel	20
3.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(1-X)^{-1}$ กับ เวลาของกระบวนการทอรีแฟคชั่น	23
3.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-X)^{n-1}$ กับ เวลาของกระบวนการทอรีแฟคชั่น	24
4.1	กราฟอนุพันธ์ลำดับหนึ่ง (DTG) ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	26
4.2	ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ	27
4.3	ค่า Enhancement factor ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ	28
4.4	ค่า Solid yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ	29
4.5	ค่า Energy yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ	30
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูงและอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และสมการถดถอย	32
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Energy yield และอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และสมการถดถอย	32
4.8	ปริมาณความชื้นของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	34
4.9	ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	34
4.10	ปริมาณสารระเหยของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	35
4.11	ปริมาณเถ้าของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	35
4.12	ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	36

รูปที่	หน้า
4.13 ค่า Solid yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	37
4.14 ค่า Energy yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	37
4.15 กราฟ Van Krevelen ของถ่านหิน กากกาแฟ กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันและชีวมวลอื่นๆ	39
4.16 องค์ประกอบเชิงปริมาณ (TG) และกราฟอนุพันธ์ลำดับหนึ่ง (DTG) ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 30 min	41
4.17 กราฟ 3 มิติแสดงลักษณะของดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ	43
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ T^{-1} (K) ที่อันดับปฏิกิริยา 4 ของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ	44



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กาแฟเป็นหนึ่งในผลผลิตทางการเกษตรที่มีการบริโภคทั่วโลก ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกกาแฟสำเร็จรูปอันดับที่ 6 ของโลก และมีเปอร์เซ็นต์การเติบโตของธุรกิจผลิตกาแฟในประเทศเท่ากับ 37.71% เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2560 (กรมพัฒนาธุรกิจการค้า, 2562) เมื่อความต้องการบริโภคกาแฟเพิ่มขึ้น ของเสียจากกระบวนการผลิต ได้แก่ กากกาแฟ จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ เป็นเรื่องน่าสนใจที่ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟมีค่าสูงถึง 21.77 MJ/kg ที่ตัวอย่างความชื้นต่ำ 3.16%wb (Zhang et al., 2018) ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าความร้อนสูงของถ่านหินลิกไนท์ (14.65-19.30 MJ/kg) (Groppa, 2017) กล่าวคือ กากกาแฟมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระบวนการผลิตกาแฟมีขั้นตอนสำคัญคือการสกัดน้ำกาแฟด้วยน้ำ (Coffee extraction) เพื่อละลายสารประกอบต่างๆ ในเมล็ดกาแฟเพื่อให้ได้น้ำกาแฟสำหรับใช้ในการดื่มบริโภค ของเสียที่เป็นกากกาแฟหลังจากการสกัดน้ำกาแฟแล้วจึงมีความชื้นสูง จำเป็นต้องลดความชื้นก่อนนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้

กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical Process) ที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพชีวมวลในกรณีที่ต้องการผลิตถ่านที่เปื้อนเชื้อเพลิงแข็ง เพราะในขณะที่เกิดกระบวนการทอรีแฟคชันองค์ประกอบที่อยู่ภายในชีวมวล เช่น น้ำ หรือสารระเหย จะถูกทำให้สลายตัว และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง โดยชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบทั่วไปเป็นเซลลูโลสและลิกนิน จึงทำให้มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลดั้งเดิม (Buratti et al., 2018) เช่น กระบวนการทอรีแฟคชันกะลามะพร้าว ที่อุณหภูมิ 250°C ทำให้ค่าความร้อนของวัสดุเพิ่มขึ้นจาก 5.570 MJ/kg เป็น 7.221 MJ/kg (Irawan et al., 2017) หรือกระบวนการทอรีแฟคชันหลิว (Willow) ที่อุณหภูมิ 300°C ทำให้ค่าความร้อนของวัสดุเพิ่มขึ้นจาก 17.467 MJ/kg เป็น 26.506 MJ/kg (Kopczynski et al., 2015) ทำให้กระบวนการทอรีแฟคชันกลายเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลหรือของเสียจากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง (Eseyin et al., 2016)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพกากกาแฟด้วยกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยมุ่งเน้นที่การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ และ การศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ โดยมีอุณหภูมิ ทอรีแฟคชันที่ศึกษาอยู่ในช่วง 200 – 350 °C และเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชันที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10 – 60 min ผู้วิจัยมุ่งหมายว่าความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์และก่อให้เกิดองค์ความรู้ใน การพัฒนากระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟและการปรับปรุงคุณภาพกากกาแฟด้วยกระบวนการ ทอรีแฟคชันต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อคุณสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ กากกาแฟ จากเมล็ดกาแฟสายพันธุ์ Robusta ที่ได้รับ จากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป บริษัท เขาช่องอุตสาหกรรม 1979 จำกัด เท่านั้น

1.3.2 กระบวนการทอรีแฟคชันที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการทอรีแฟคชันภายใต้ สภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนจำกัด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในสภาวะปัจจุบัน ประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ภาคการเกษตร และภาคครัวเรือน เป็นผลให้มีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรายงานสถานการณ์พลังงาน ในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2564 พบปริมาณการใช้พลังงานขั้นต้นที่สูงขึ้น 0.01 % เทียบได้กับน้ำมันดิบ 2,008 พันบาร์เรลต่อวัน โดยมีความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2564 อยู่ที่ 143,663 ล้านหน่วย เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 1.0 ซึ่งการใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่ร้อยละ 45 อยู่ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเศรษฐกิจโลกมีการฟื้นตัวส่งผลให้เกิดการผลิตสินค้าเพื่อส่งออก (กระทรวงพลังงาน, 2564) สอดคล้องกับภาพรวมพลังงาน เดือนมกราคม ถึง กุมภาพันธ์ 2565 ที่แสดงภาพรวมการนำเข้าพลังงานขั้นต้น (Primary Energy) และพลังงานขั้นสุดท้าย (Final Energy) เพิ่มขึ้นที่ 0.4 และ 11.3% ตามลำดับ (กระทรวงพลังงาน, 2565) เพื่อจัดหาปริมาณเชื้อเพลิงให้ได้ตามความต้องการ ลดปริมาณการนำเข้าเชื้อเพลิง ส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและลดปัญหามลพิษจากการเผาไหม้ รัฐบาลจึงสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกอื่น ๆ ซึ่งหนึ่งในนั้นคือการใช้พลังงานจากพืชหรือชีวมวล

2.1 ชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิล โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ 1. เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ ชังข้าวโพด กากมันสำปะหลัง กากอ้อย เศษไม้ หรือ กะลามะพร้าว และ 2. เป็นพืชพลังงานที่ถูกปลูกขึ้นมาโดยเฉพาะ เช่น หญ้าเนเปียร์ จากฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีเพาะปลูก พ.ศ. 2556 ชีวมวลในประเทศไทยที่เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกในปี 2556 มีจำนวน 134 ล้านตัน ใช้ประโยชน์แล้ว 71 ล้านตัน และคงเหลือ 62 ล้านตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) นอกจากชีวมวลที่เป็นของเสียทางภาคการเกษตรแล้ว ยังมีชีวมวลที่เป็นของเสียจากภาคอุตสาหกรรม โดยกากกาแฟก็เป็นหนึ่งในของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในทุกๆปี เนื่องจากตลาดกาแฟมีการขยายตัวอย่างมาก ทำให้ความต้องการใช้เมล็ดกาแฟของโรงงานแปรรูปกาแฟในประเทศไทยเพิ่มขึ้นจาก 61,480 ตัน ในปี 2554 เป็น 80,000 ตัน ในปี 2558 (กรมวิชาการเกษตร, 2562) เมื่อปริมาณความต้องการเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้น ของเสียจึงย่อมเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กากกาแพ

กากกาแพเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์การเกษตรที่มีการบริโภคทั่วโลกโดยหนึ่งในแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญ ได้แก่ ประเทศบราซิล เวียดนาม โคลอมเบีย และอินโดนีเซีย คิดเป็น 66% ของมูลค่ารวม สำหรับประเทศไทยอ้างอิงจากข้อมูลการส่งออกปี 2561 การส่งออกมีอัตราการขยายตัว 74% และเป็นผู้ส่งออกกากกาแพสำเร็จรูปเป็นลำดับ 6 ของโลก นอกจากนี้ธุรกิจกากกาแพในประเทศไทยยังมีการเติบโตและขยายอย่างรวดเร็ว ร้านกากกาแพใหม่เพิ่มขึ้น 37.71% เปรียบเทียบกับปี 2560 (กรมพัฒนาธุรกิจการค้า, 2562) และคาดการณ์ว่าความต้องการใช้เมล็ดกากกาแพจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5.42% (กรมวิชาการเกษตร, 2562) เมื่อปริมาณการบริโภคเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณของเสียมีเพิ่มขึ้นด้วย กระบวนการแปรรูปกากกาแพจะทำให้กากกาแพเป็นของเหลือทิ้ง และบางโรงงานมีการนำของเสียมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้หม้อไอน้ำ เนื่องจากองค์ประกอบพื้นฐานที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากกว่า 15%db ส่งผลให้ปริมาณค่าความร้อนสูงในสถานะที่มีความชื้นต่ำอยู่ที่ 21.69 MJ/kg (Buratti et al., 2017) ซึ่งสูงกว่าลิกไนท์ที่มีค่าความร้อนอยู่ที่ 14.65-19.30 MJ/kg (Grosso, 2017) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของชีวมวลอื่นๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่ากากกาแพที่มีความชื้นต่ำมีค่าความร้อนสูง แสดงให้เห็นว่ากากกาแพเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนที่เหมาะสม แต่กากกาแพที่ผ่านกระบวนการแปรรูปจะมีค่าความชื้นสูง (66%wb) ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความร้อน กระบวนการทอรีแฟคชันจึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพกากกาแพให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.1 ค่าความร้อนและความชื้นของชีวมวล

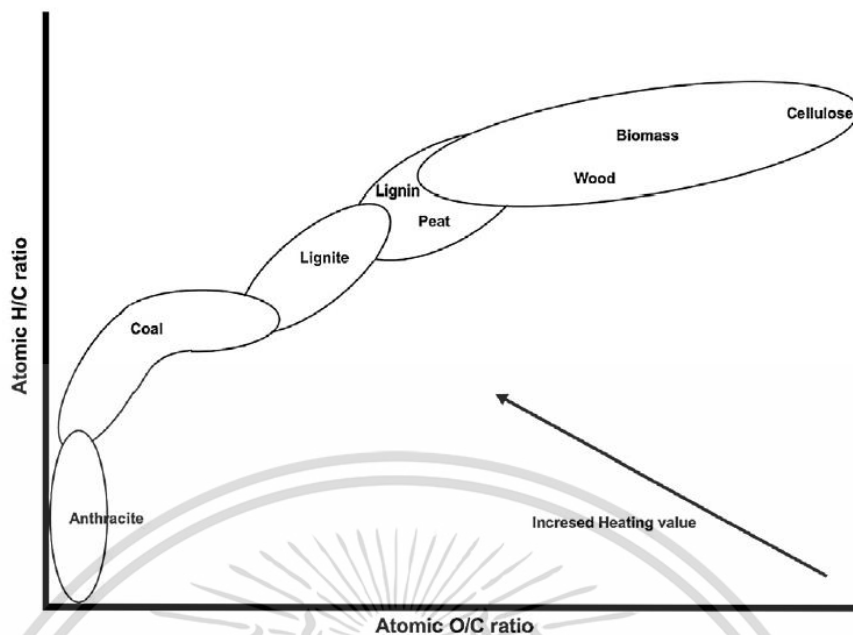
ชีวมวล	ความชื้น (%)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
ฟางข้าว	10	12.33
แกลบ	12	13.52
ทะลายปาล์ม	12	16.90
กะลามะพร้าว	12	17.93
กากมันสำปะหลัง	59.4	1.47
ไม้ยางพารา	55	6.57
กากกาแพ	3.14	21.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการทอรีแฟคชัน

กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นหนึ่งในกระบวนการแปรสภาพชีวมวลในรูปแบบของแข็งที่เป็นที่รู้จักกว้างขวาง ในขณะที่กระบวนการทอรีแฟคชันกำลังเกิดขึ้น ความชื้นและส่วนที่ระเหยได้ (ส่วนใหญ่เป็นเฮมิเซลลูโลส บางส่วนเป็นลิกนิน) จะเกิดการสลายพันธะและกลายเป็นของแข็ง ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันมักจะประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินซึ่งส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนสูงกว่าชีวมวลดั้งเดิม และทำให้กระบวนการดังกล่าวเป็นขั้นตอนสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลที่เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร หรือทางอุตสาหกรรมในฐานะแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง (Eseyin et al., 2016)

กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical process) คือเป็นการแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยการใช้ความร้อนจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยการเผาไหม้แบบไม่ใช้ออกซิเจนหรืออยู่ในสถานะที่ออกซิเจนมีจำกัด โดยทั่วไปอุณหภูมิเผาไหม้จะอยู่ในช่วง 200 - 300°C (Basu, 2018) หรือที่ 350°C ที่ความดันบรรยากาศ และคงไว้เป็นระยะเวลาที่เหมาะสม งานวิจัยเมื่อไม่นานนี้ได้นิยามระยะเวลาของกระบวนการอยู่ระหว่าง 0.5 - 2 hrs แต่อาจจะน้อยลงกว่านั้นหากกระบวนการทอรีแฟคชันกระทำที่อุณหภูมิสูง (280 - 350°C) (Nunes et al., 2017) ระหว่างเกิดกระบวนการองค์ประกอบทางชีวภาพของชีวมวลจะเริ่มสลายตัว ปลดปล่อยสารระเหยชนิดต่างๆ ส่วนที่อุดมไปด้วยออกซิเจนจะกลายเป็นก๊าซทอรีแฟคชันซึ่งมีทั้งก๊าซควบแน่นและก๊าซไม่ควบแน่น (Carrasco et al., 2013) นอกจากนี้ อุณหภูมิและระยะเวลาของกระบวนการยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณสมบัติของชีวมวล เมื่อปัจจัยเหล่านั้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเผาไหม้และค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณสัดส่วนออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่คาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้คุณสมบัติชีวมวลเข้าใกล้ถ่านหิน (Nunes et al., 2017) ดังแสดงใน Van Krevelen diagram (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 Van Krevelen diagram (Nunes et al., 2017)

กระบวนการทอรีแฟคชันเป็นการกำจัดออกซิเจนออกจากชีวมวลโดยมีจุดประสงค์ในการสร้างชีวมวลในรูปแบบของแข็งที่มีคุณภาพ โดยมีกระบวนการ 5 ขั้นตอน ดังนี้ (Van der Selt et al., 2011)

1. การให้ความร้อนขั้นต้น (Initial heating) : ชีวมวลจะถูกให้ความร้อนและเพิ่มอุณหภูมิจนถึงสถานะที่น้ำเกิดการระเหย
2. การเตรียมอบแห้ง (Pre-drying) : น้ำจะถูกทำให้ระเหยอุณหภูมิคงที่ที่ 100°C
3. การให้ความร้อนหลังอบแห้ง (Post-drying and intermediate heating) : อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 200°C จนทำให้พันธะภายในของชีวมวลแตกและเป็นเหตุให้เกิดการลดลงของมวล
4. ทอรีแฟคชัน (Torrefaction) : กระบวนการทอรีแฟคชันจะเริ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเตาเผาอยู่ที่ 200°C และจะหยุดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 200°C
5. การเย็นตัวของของแข็ง (Solids cooling) : หลังจบกระบวนการทอรีแฟคชัน ชีวมวลที่ถูกปรับปรุงคุณภาพจะถูกปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

กระบวนการทอรีแฟคชัน ไพโรไลซิส และคาร์บอนเซชัน ล้วนเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่แตกต่างกันที่วัตถุประสงค์ กระบวนการไพโรไลซิสจะให้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของเหลว และมีช่วงอุณหภูมิของกระบวนการที่กว้างและระยะเวลาที่สั้น กระบวนการคาร์บอนเซชันจะกระทำที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 400°C) และระยะเวลาของกระบวนการที่ยาวนานและให้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของถ่าน (Lee et al., 2019 และ Basu, 2018) ในขณะที่เป้าหมายของกระบวนการทอรีแฟคชัน คือการรักษาผลผลิตที่เป็นของแข็งไว้และเพิ่มคุณสมบัติที่ดีของเชื้อเพลิง เช่น ความสามารถในการบดที่ดี และค่าความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลดั้งเดิม (Carrasco et al., 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คุณสมบัติของชีวมวลและการวิเคราะห์คุณสมบัติ

คุณสมบัติของชีวมวลเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายถึงศักยภาพของชีวมวลชนิดนั้นๆ และสามารถนำค่าดังกล่าวมาพิจารณาเลือกใช้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพหรือการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานให้เหมาะสมได้ โดยคุณสมบัติที่สำคัญของชีวมวลได้แก่ ค่าความชื้น ค่าความร้อน องค์ประกอบภายใน ขนาดเชื้อเพลิงและความหนาแน่น (Daniel, 2010)

2.4.1 ความชื้น

คุณลักษณะอย่างหนึ่งที่เป็นเอกลักษณ์ของชีวมวลก็คือความชื้น เนื่องจากชีวมวลส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจึงมีปริมาณความชื้นสูง ซึ่งความชื้นมีผลต่อกระบวนการเผาไหม้เป็นอย่างมาก หากชีวมวลมีความชื้นสูงจะทำให้ค่าความร้อนและประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง (Daniel, 2010) อ้างอิงจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแข็ง (มอก. 2772-2560) ระบุวิธีให้ใช้ ASTM E871 (Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels) เป็นวิธีวิเคราะห์ความชื้นของชีวมวล

2.4.2 ค่าความร้อน

ค่าความร้อนของชีวมวลคือปริมาณพลังงานของชีวมวลที่ปล่อยออกมาเมื่อชีวมวลนั้นถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ (Basu, 2018) โดยค่าความร้อนสามารถอ้างอิงได้ 2 รูปแบบได้แก่ ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) และ ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) โดยค่า HHV จะเป็นค่าความร้อนทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งรวมค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ และค่า LHV จะเป็นค่าพลังงานของชีวมวลที่หักค่าพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำเป็นไอออกแล้ว อ้างอิงจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแข็ง (มอก. 2772-2560) ระบุวิธีให้ใช้ ASTM E711 (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter) เป็นวิธีวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวล

2.4.3 องค์ประกอบภายใน

โดยทั่วไปชีวมวลจะประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) และอาจประกอบไปด้วยคลอรีน (Cl) หรือซัลเฟอร์ (S) จำนวนเล็กน้อย (Basu, 2018) การใช้งานชีวมวลในรูปแบบพลังงานเชื้อเพลิงหรือการออกแบบระบบเผาไหม้ที่เหมาะสมจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์องค์ประกอบภายใน โดยทั่วไปจะทำการวิเคราะห์ใน 2 ลักษณะ คือ 1.การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) ด้วยวิธีวิเคราะห์การสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ทำให้ทราบปริมาณความชื้น คาร์บอนคงตัว สารระเหย และถ่าน 2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ด้วยวิธีวิเคราะห์ ASTM D4239, ASTM D5373 และ ASTM D7582 ผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบปริมาณไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และถ่าน

2.4.4 ขนาดเชื้อเพลิงและความหนาแน่น

ขนาดของชีวมวลนี้เป็นปัจจัยสำคัญในแง่ของค่าการขนส่งและการเก็บรักษา และความหนาแน่นของชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง มลทิน และรูพรุนในเนื้อชีวมวลนั้น ซึ่งชีวมวลอัดเม็ดจะมีความหนาแน่นจากกระบวนการผลิตและกระบวนการอัดเม็ดที่มีความร้อนทำให้ความชื้นต่ำลง ทำให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น โดยสามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างมวลของเม็ดเชื้อเพลิงต่อปริมาตรของเม็ดเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (เจนจิรา อุตเรือน และคณะ, 2560)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 อิทธิพลของกระบวนการทอรีแฟคชันต่อคุณสมบัติของชีวมวล

Tsai and Liu (2013) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงเคมี ความร้อน (Thermochemical property) และความหนาแน่นที่ส่งผลต่อกากกาแฟที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการทอรีแฟคชันที่ 230 - 350°C เป็นระยะเวลา 10 min โดยใช้เตาไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 290°C มีการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงสุด และที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 290 - 320°C มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนสูง ความหนาแน่นของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 290 - 320°C แต่ลดลงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 290°C ถึงแม้กระบวนการทอรีแฟคชันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในทำให้กากกาแฟที่แปรสภาพแล้วมีความเปราะมากขึ้นแต่กระบวนการนี้ก็ยังคงเหมาะสมที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในการผลิตกระแสไฟฟ้า

Matali et al. (2016) ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการทอรีแฟคชันที่ส่งผลต่อคุณสมบัติภายนอกและคุณสมบัติทางเคมีของทะเลาปาล์มและกระถินเพื่อทดสอบศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด โดยทำการทดลองในเตาเผาแบบท่อแนวนอนที่อุณหภูมิ 5 ระดับ (200, 225, 250, 275 และ 300°C) เป็นเวลา 60 min ด้วยอัตราการทำความร้อน 10°C/min ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อคุณสมบัติของชีวมวลเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้น มวลของชีวมวลจะยิ่งลดลง และพลังงานจะยิ่งเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้

แนะนำอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 250 - 300 °C สำหรับระยะเวลา 1 hr และเสนอแนะว่านอกจากนี้ งานวิจัยต่อไปควรเน้นที่การปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมตามชนิดของชีวมวล ความหนาแน่น ความสามารถในการบด พฏิกิริมจลนศาสตร์ พฏิกิริมการเผาไหม้ และจลนศาสตร์ของชีวมวล นั้นๆ

Martín-Lara et al. (2017) ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ส่งผลต่อ คุณสมบัติของกึ่งมะกอก โดยทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 200 และ 300°C ระยะเวลา 10 และ 60 min และวิเคราะห์ค่าปริมาณกลุ่มสาร วิเคราะห์แบบแยกธาตุ ความหนาแน่นรวม ค่าความร้อน วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี วิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) และวิเคราะห์การแยกสลายด้วยความร้อน พบว่ากึ่ง มะกอกที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ 300°C เวลา 60 min มีอัตราส่วนของคาร์บอนคงตัวต่อสาร ระเหยเพิ่มขึ้นเป็นผลให้คุณสมบัติในฐานะเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นรวมไม่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างมีนัยสำคัญหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น การวิเคราะห์ SEM พบว่าโครงสร้างพื้นผิวของกึ่ง มะกอกมีการแตกและถูกทำลายด้วยกระบวนการทอรีแฟคชั่น ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูงพบการสลายตัว ของเฮมิเซลลูโลสสูง

Buratti et al. (2017) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา อัตราการทำความร้อน ต่อกากกาแฟและเปลือกกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยใช้ Response surface methodology (RSM) และออกแบบการทดลองแบบ three-level, three-factor Box-Behken design พบว่าอิทธิพลของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนั้นส่งผลต่อตัวกากกาแฟและเปลือก กาแฟเป็นลำดับ โดยอุณหภูมิมิผลต่อตัวอย่างสูงสุด รองลงมาคือระยะเวลา และอัตราการทำความ ร้อนมีอิทธิพลต่ำที่สุด โดยผลการทดลองทั้งหมดถูกวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และสร้างแบบจำลอง second-order polynomial โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.95 นอกจากนี้ยังรายงานสภาวะของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่เหมาะสมของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด สำหรับกากกาแฟคือที่อุณหภูมิ 256.0°C อัตราการทำความร้อน 25°C/min ระยะเวลา 20 min และสำหรับเปลือกกาแฟคือที่อุณหภูมิ 271.7°C อัตราการทำความร้อน 5°C/min ระยะเวลา 20 min

Zhang et al. (2018) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกระบวนการทอรีแฟคชัน ระดับความแรง และการใช้พลังงานของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพในเชื้อเพลิงแข็งของชีวมวลและของเหลือทิ้ง จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ กากกาแฟ ส่วนเหลือทิ้งของสมุนไพรจีน (Chinese medicine residue) และส่วนเหลือทิ้งของสาหร่ายขนาดเล็ก (microalga residue) ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันที่ 200 - 300°C ระยะเวลา 15 - 60 min โดยวิเคราะห์ ค่า Energy yield, Enhancement factor ค่าความร้อนสูง ปฏิกริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไฮโดรเจน (Dehydrogenation) และสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนและสัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน พบว่าดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction severity index, TSI) ที่แสดงในรูปของการสูญเสียมวลนั้น มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวล ที่ระดับความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันสูง ชีวมวลจะมีสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดลง

2.5.2 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการผลิตชีวมวล

Carrasco et al. (2013) ทำการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่ต่างกันเพื่อใช้อธิบายคุณลักษณะของโอ๊คแดง (*Quercus rubra*) ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันโดยใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดและวิเคราะห์การลดลงของมวล ค่าความร้อน ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) โดยศึกษากระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 4 ระดับ (230, 270, 300 และ 330°C) ที่ระยะเวลา 10 20 และ 30 min พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อมวลที่ลดลงและค่าความร้อนนั้นสูงกว่าอิทธิพลจากระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่า one-step kinetic model และอันดับปฏิกริยา เท่ากับ 1 สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของมวลโอ๊คแดงขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชันด้วยเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดได้ พบค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกริยา (reaction rate constant) ค่าระดับพลังงานกระตุ้น (Activation energy) และค่า frequency factor ของโอ๊คแดงที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 300°C เท่ากับ 0.212 min⁻¹, 11.9 kJ/mol และ 2.57 min⁻¹ ตามลำดับ

Chen et al. (2014) ศึกษาจลนพลศาสตร์และลักษณะกระบวนการทอรีแฟคชันแบบอุณหภูมิคงที่และแบบอุณหภูมิไม่คงที่ของสาหร่ายขนาดเล็ก *Scenedesmus obliquus* (*S. obliquus*) CNW-N โดยใช้วิธีวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis) พบลักษณะการสลายตัวของสาหร่ายขนาดเล็ก (*S. obliquus*) จำนวน 4 ช่วง ประกอบไปด้วยช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำในสาหร่ายและสารระเหยเล็กน้อย จากนั้นจะเป็นการสลายตัวของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการทอรีแฟคชันแบบอุณหภูมิคงที่กับแบบอุณหภูมิไม่คงที่ พบว่ากระบวนการทอรีแฟคชันแบบอุณหภูมิไม่คงที่มีผลต่อการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพมากกว่า และการเพิ่มของอัตราการให้ความร้อนในกระบวนการทอรีแฟคชันแบบอุณหภูมิต่ำที่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพ สัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของสาหร่ายขนาดเล็กลดลงในขณะที่สัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน และรายงานค่าระดับพลังงานกระตุ้นที่แนะนำสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันแบบอุณหภูมิต่ำคือ 57.52 kJ/mol และ 40.14 ถึง 88.41 kJ/mol สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันแบบอุณหภูมิต่ำที่ไม่คงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

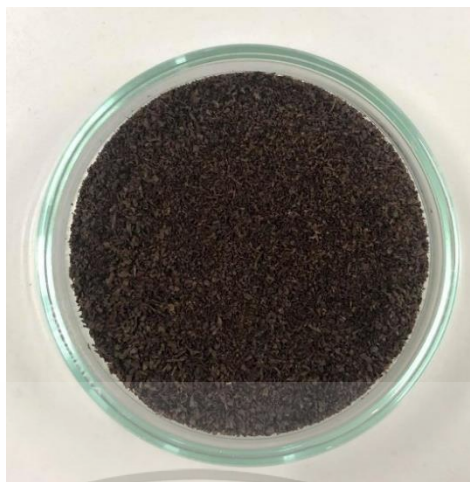
การดำเนินงานการวิจัย

3.1 กากกาแฟและการเตรียมตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้รับกากกาแฟสายพันธุ์โรบัสตา (Robusta coffee) (รูปที่ 3.1) จากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูป บริษัท เขาช่องอุตสาหกรรม 1979 จำกัด ซึ่งมีความชื้นเท่ากับ $66 \pm 2\% \text{wb}$ (วิเคราะห์ความชื้นดังหัวข้อ 3.4) โดยผู้วิจัยนำกากกาแฟมาตั้งพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 1 hr ณ ห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการลดความชื้นด้วยการอบลมร้อน (ULM 500, Memmert GmbH+Co.KG, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ 105°C เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายเท่ากับ $5 \pm 2\% \text{wb}$ ซึ่งนับเป็นช่วงความชื้นที่กากกาแฟมีความสมดุลกับห้องปฏิบัติการและเป็นความชื้นที่ยอมรับได้ภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2772-2560) แล้วทำการคัดขนาดกากกาแฟที่ถูกลดความชื้นด้วยตะแกรงร้อน เบอร์ 40 (ขนาดตะแกรง $425 \mu\text{m}$) เพื่อแยกอนุภาคกากกาแฟที่มีขนาดเล็กกว่า $425 \mu\text{m}$ (รูปที่ 3.2) เก็บรักษาในถุงซิปล็อคชนิดพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปดำเนินการทดลองต่อไป



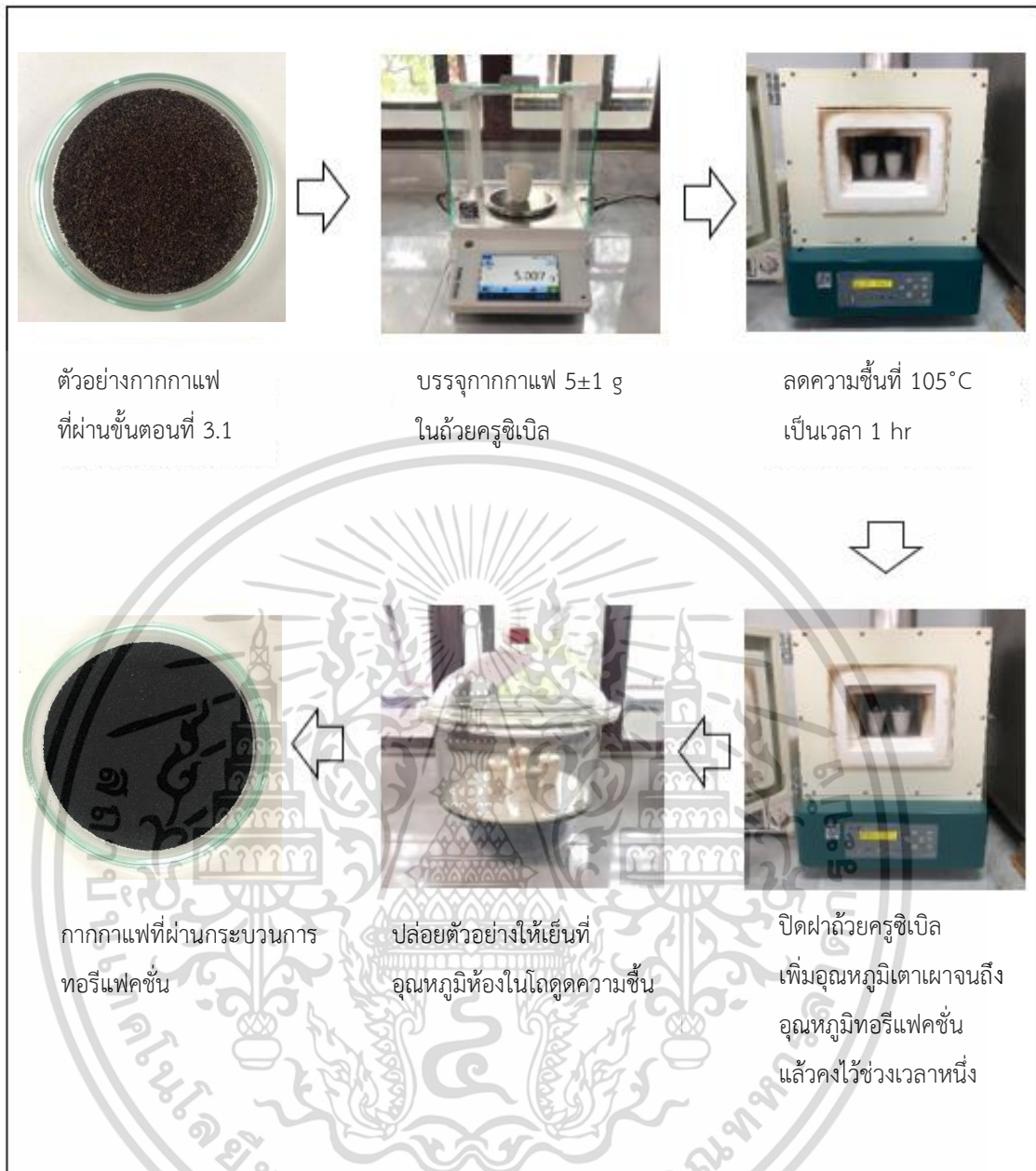
รูปที่ 3.1 กากกาแฟก่อนเตรียมตัวอย่างมีขนาดอยู่ระหว่าง 2.36 mm ถึง $75 \mu\text{m}$



รูปที่ 3.2 กากกาแฟที่เตรียมสำหรับการทดลองที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 425 μm

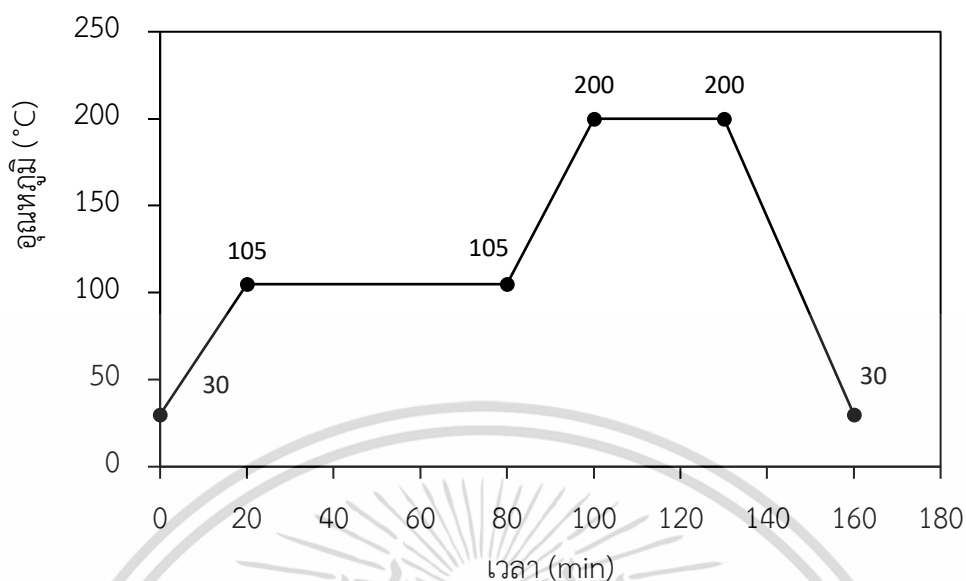
3.2 กระบวนการทอรีแฟคชั่นกากกาแฟ

ซึ่งตัวอย่างกากกาแฟด้วยเครื่องชั่งความเที่ยงตรงสูง (Precision Balance ME303T/00, Mettler Toledo, Switzerland) ปริมาณ 5 ± 1 g ในถ้วยเซรามิกครุซีเบล (Crucible porcelain 50ml เส้นผ่านศูนย์กลาง 45 สูง 56 mm) นำตัวอย่างมาทำกระบวนการทอรีแฟคชั่นตามวิธีของ Tsai and Liu (2013) ด้วยเตาเผาไฟฟ้า (JSMF-45T, JSR, Korea) โดยทำการลดความชื้นของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 1 hr จากนั้นปิดฝาด้วยครุซีเบลเพื่อสร้างสภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนจำกัดและเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาจนถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่กำหนดด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งที่ ($5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) แล้วคงระยะเวลาของกระบวนการ (Process time) ไว้ที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 min จากนั้นจึงปล่อยให้ตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 กระบวนการทอริแฟคชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงอุณหภูมิ – เวลา ของกระบวนการทอรีแฟคชันที่ 200°C ระยะเวลา 30 min

3.3 การทดลอง

3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ

การศึกษาดังกล่าวจะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ ดำเนินการโดยกำหนดอุณหภูมิทอรีแฟคชัน 4 ระดับ ได้แก่ 200, 250, 300 และ 350°C ที่ระยะเวลาของกระบวนการ 30 min ในทุกอุณหภูมิ ซึ่งกำหนดให้ตัวอย่างกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันเป็นตัวอย่างควบคุม โดยมีการใช้แผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานของตัวอย่างประกอบด้วยการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis), การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis), ค่าความร้อนสูง, Solid yield, Enhancement factor และ Energy yield รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในหัวข้อ 3.5 ในการทดลองนี้ มีการทำซ้ำอย่างน้อย 2 ซ้ำ ใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยจะถูกอธิบายด้วยค่า Pearson's correlation coefficients และแบบจำลองการทำนายระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชันกับค่าความร้อนสูง และ Energy yield ทำโดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและวิเคราะห์สมรรถนะของสมการด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชัน

กากกาแฟ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟเป็นการศึกษาสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชัน ซึ่งดำเนินการโดยกำหนดอุณหภูมิทอรีแฟคชัน 4 ระดับ ได้แก่ 200, 250, 300 และ 350 °C ที่ระยะเวลาของกระบวนการ 6 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 min ในทุกอุณหภูมิ ในการศึกษาครั้งนี้ มีการวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานของตัวอย่างกากกาแฟ ได้แก่ การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis), การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis), ค่าความร้อนสูง, Solid yield และ Energy yield รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในหัวข้อ 3.5 การวิเคราะห์ดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction severity index, TSI) ดังหัวข้อ 3.6 และการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชัน แสดงในหัวข้อ 3.7

3.4 การวิเคราะห์ความชื้น

ทำการบรรจุตัวอย่างจำนวน 5±1 g ลงใน moisture can เพื่อเตรียมทำการกำจัดความชื้น โดยวิธีการอบด้วยตู้อบลมร้อน (ULM 500, Memmert GmbH+Co.KG, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 hrs (AOAC, 1995) หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำมาชั่งหามวลของตัวอย่างแห้งซึ่งปริมาณความชื้นของตัวอย่างกากกาแฟสามารถวิเคราะห์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Moisture content (\%wb)} = \frac{M_{\text{wet}} - M_{\text{dry}}}{M_{\text{wet}}} \quad (3.1)$$

เมื่อ M_{wet} คือ มวลของตัวอย่างที่มีความชื้น (g)
 M_{dry} คือ มวลของตัวอย่างแห้ง (g)

3.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ

3.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis)

ทำการบรรจุตัวอย่างกากกาแฟจำนวน 20 ± 1 mg ลงในถ้วยครุซีเบลที่ทำจาก อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แล้วนำไปใส่เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TG209F3 Tarsus, Netzsch, Germany) (รูปที่ 3.5) ในขั้นตอนเริ่มต้นตัวอย่างจะอยู่ในสถานะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง $33^\circ C$ แล้วคงไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 5 min จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนถึง $700^\circ C$ ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่ที่ $10^\circ C/min$ หลังจากคงไว้เป็นเวลา 30 min ก๊าซออกซิเจนจะถูกปล่อยสู่เตาเผาเป็นเวลา 15 min เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (จิรัฐ วรรณโชติ และคณะ, 2561) โดยทุกตัวอย่างมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ข้อมูลที่ได้แสดงในรูปของกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวอย่างขณะเกิดการเผาไหม้ (TG curve) (รูปที่ 3.6) ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์หองค์ประกอบพื้นฐานได้แก่ ค่าความชื้น (Moisture content, MC), สารระเหย (Volatile matter, VM) และเถ้า (Ash) สำหรับ คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

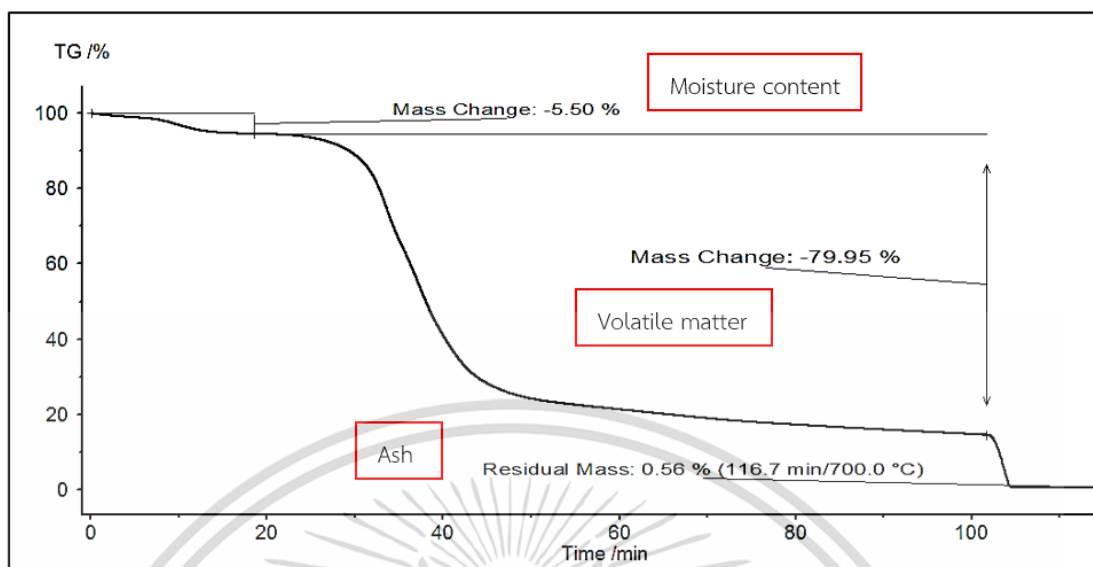
$$\text{Fixed carbon (\%)} = 100 - \text{MC} - \text{VM} - \text{Ash} \quad (3.2)$$

เมื่อ MC คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น
 VM คือ เปอร์เซ็นต์สารระเหย
 Ash คือ เปอร์เซ็นต์เถ้า



รูปที่ 3.5 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TG209F3 Tarsus, Netzsch, Germany)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 TG curve ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (ตัวอย่างควบคุม)

3.5.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

นำตัวอย่างกากกาแฟจำนวน 40 ± 5 g มาวิเคราะห์แบบแยกธาตุเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบชีวมวลอย่างละเอียดตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) ซึ่งวิธีวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1 ดำเนินการโดยศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม (ศนพ.)

ตารางที่ 3.1 รายการคุณสมบัติและวิธีการวิเคราะห์ Ultimate Analysis ของกากกาแฟ

คุณสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์
ไฮโดรเจน, %	ASTM D5373
คาร์บอน, %	ASTM D5373
ไนโตรเจน, %	ASTM D5373
ออกซิเจน, %	ASTM D4239, 5373, 7582
ซัลเฟอร์, %	ASTM D4239
เถ้า, %	ASTM D 7582

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

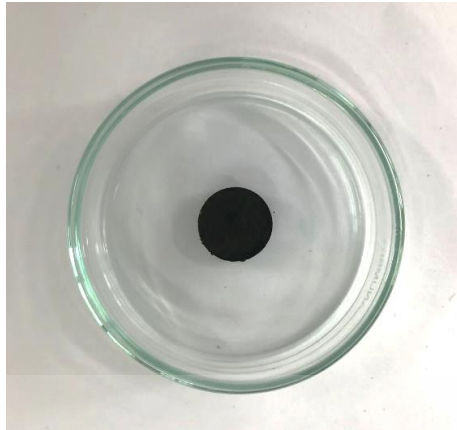
3.5.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (HHV)

วิเคราะห์ค่าความร้อนสูงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (C200, IKA, Germany) (รูปที่ 3.7) ในโหมด Isoperibol ที่อุณหภูมิห้อง ($25\pm 2^{\circ}\text{C}$) โดยนำตัวอย่างจำนวน 0.5 ± 0.1 g มาอัดด้วยเครื่องอัดเม็ด เพื่อให้ได้รูปทรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm สูง 5 mm (รูปที่ 3.8) จากนั้นเปิด vessel (รูปที่ 3.9) เพื่อผูกด้ายฝ้าย (Cotton thread) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของลวดนำความร้อน (Ignition wire) และวางครุชชีเบิลบน Crucible holder แล้ววางเม็ดตัวอย่างกากกาแฟลงในถ้วยครุชชีเบิลโดยให้ทับปลายเส้นด้ายทั้ง 2 ด้าน แล้วจึงใส่กลับใน vessel และปิดฝาให้สนิท จากนั้นเติมก๊าซออกซิเจน 99.5% ลงใน vessel โดยการเปิดวาล์วของถังก๊าซออกซิเจนที่ตั้ง Pressure gauge ไว้ 30 bar ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที แล้วจึงสวม Ignition adapter ด้านบนของ vessel (รูปที่ 3.10) ก่อนวางลงในเครื่อง Bomb calorimeter จากนั้นทำการเติมน้ำกลั่นที่มีการผสมสาร AQUA-PRO (อัตราส่วน AQUA-PRO 2 ml : น้ำกลั่น 1 l) ที่มีอุณหภูมิ $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ให้อยู่ในระดับน้ำที่กำหนด เริ่มต้นการวิเคราะห์โดยใส่ค่าน้ำหนักตัวอย่างใช้เวลาประมาณ 17-20 min เครื่องจะแสดงค่าความร้อนเป็นหน่วย J/g โดยทุกตัวอย่างทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง

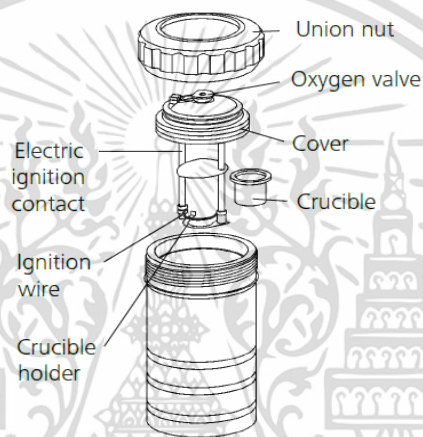


รูปที่ 3.7 เครื่อง Bomb Calorimeter (C200, IKA, Germany)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างกากกาแฟอัดเม็ด



รูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบ vessel (IKA, 2022)



รูปที่ 3.10 แสดงการสวม Ignition adapter ลงด้านบนของ vessel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 การคำนวณค่า Enhancement factor

นำค่าความร้อนจากการวิเคราะห์ในข้อ 3.5.3 ที่ได้มาคำนวณค่า Enhancement factor เพื่อหาสัดส่วนของค่าความร้อนของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ดังสมการที่ 3.3 (Zhang et al., 2018)

$$\text{Enhancement factor} = \frac{\text{HHV}_{\text{Torrefied SCG}}}{\text{HHV}_{\text{SCG}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ HHV_{SCG} คือ ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟ (ตัวอย่างควบคุม) (MJ/kg)

$\text{HHV}_{\text{Torrefied SCG}}$ คือ ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (MJ/kg)

3.5.5 การคำนวณค่า Solid yield

กระบวนการทอรีแฟคชั่นเป็นการเผาไหม้องค์ประกอบบางชนิดของชีวมวล ดังนั้นเมื่อจบกระบวนการทอรีแฟคชั่น มวลของตัวอย่างย่อมลดลง จึงจำเป็นต้องคำนวณ ค่า Solid yield เพื่อแสดงเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างที่เหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.4 (Zhang et al., 2018)

$$\text{Solid yield (\%)} = \frac{\text{Weight}_{\text{Torrefied SCG}}}{\text{Weight}_{\text{SCG}}} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ $\text{Weight}_{\text{SCG}}$ คือ มวลกากกาแฟก่อนผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (g)

$\text{Weight}_{\text{Torrefied SCG}}$ คือ มวลกากกาแฟหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (g)

3.5.6 การคำนวณค่า Energy yield

เมื่อทราบค่า Enhancement factor และ Solid yield จะสามารถคำนวณค่า Energy yield ของตัวอย่างได้ ซึ่งค่า Energy yield ที่ใช้อธิบายพลังงานที่กักเก็บอยู่ของชีวมวลเมื่อผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.5 (Zhang et al., 2018)

$$\text{Energy yield (\%)} = \text{Solid yield} \times \text{Enhancement factor} \quad (3.5)$$

3.6 ดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction severity index, TSI)

ค่าดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันเป็นค่าที่ใช้อธิบายระดับความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยการจับคู่ของอุณหภูมิและระยะเวลาของกระบวนการที่แตกต่างกัน อาจส่งผลให้เกิดความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันในระดับเดียวกัน สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.6 (Chen et al., 2014)

$$\text{Torrefaction severity index (TSI)} = \frac{\Delta WI}{\Delta WI_{\text{ref}}} \quad (3.6)$$

เมื่อ ΔWI คือ ค่าการลดลงของมวลที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชันที่สภาวะหนึ่ง (%)

ΔWI_{ref} คือ ค่าการลดลงของมวลที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชันที่สภาวะอ้างอิง (%)

ในงานวิจัยนี้มีช่วงของอุณหภูมิทอรีแฟคชันที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 200 °C ถึง 350 °C และระยะเวลาของกระบวนการคือ 10 ถึง 60 min ดังนั้นที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันและระยะเวลาของกระบวนการที่ให้ค่า ΔWI สูงสุด จะถูกเลือกเป็นค่า ΔWI_{ref}

3.7 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้อธิบายและทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่เปลี่ยนแปลงไปขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชัน การสลายตัวของกากกาแฟขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชันสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงของมวลกากกาแฟต่อหน่วยเวลา ดังสมการที่ 3.7 (Lu et al., 2013)

$$\frac{dX}{dt} = k(1 - X)^n \quad (3.7)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate constant)

n คือ อันดับปฏิกิริยา (order of reaction)

X คือ อัตราส่วนการสลายตัวของชีวมวล ณ เวลา t

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8

$$X = \frac{W_{\text{initial}} - W_t}{W_{\text{initial}} - W_{\text{ash}}} \quad (3.8)$$

เมื่อ	W_{initial}	คือ มวลกากกาแฟเริ่มต้น (g)
	W_t	คือ มวลกากกาแฟที่เวลา t (g)
	W_{ash}	คือ มวลของเถ้ากากกาแฟ (g)

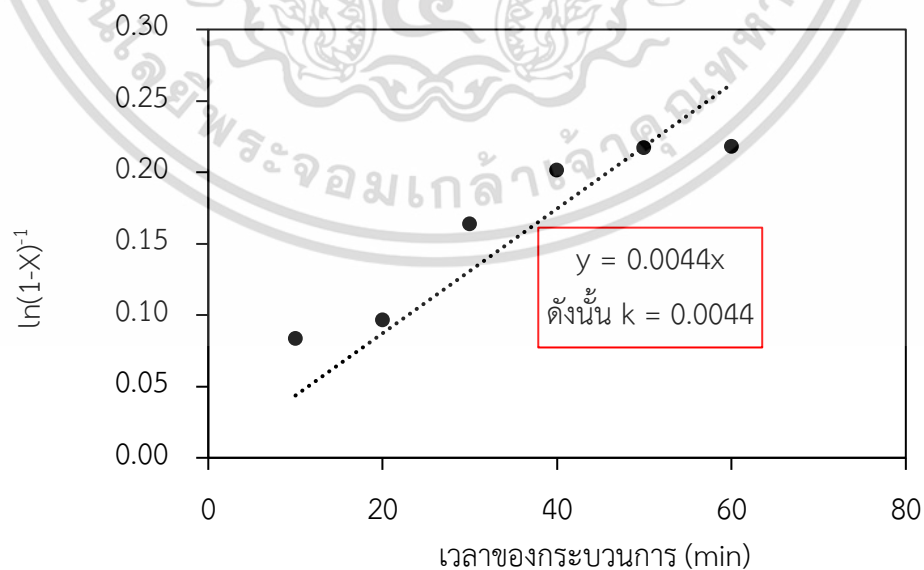
โดยใช้แบบจำลอง Isothermal torrefaction kinetics (Chen et al., 2014) (สมการที่ 3.9 และ 3.10) ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของกากกาแฟขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชันในระยะเวลา 60 min

$$\ln \frac{1-X_0}{1-X} = k(t-t_0) \quad ; \quad n = 1 \quad (3.9)$$

$$(1-X)^{1-n} - (1-X_0)^{1-n} = k(n-1)(t-t_0) \quad ; \quad n \neq 1 \quad (3.10)$$

เมื่อ X_0 คือ X ที่เวลาเริ่มต้น ($t = t_0$)

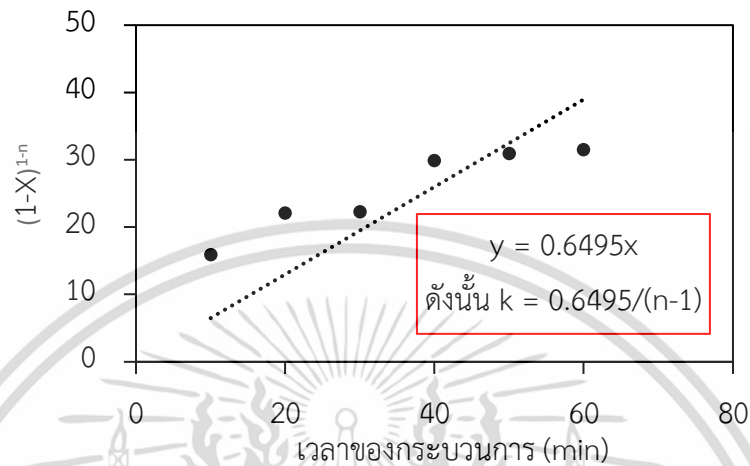
จากสมการที่ 3.9 ในกรณีที่ $n = 1$ พบว่าหากทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(1-X)^{-1}$ กับเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชันและสร้างสมการเส้นตรง จะสามารถหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ได้จากความชัน (slope) ของสมการ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(1-X)^{-1}$ กับ เวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.10 ในกรณีที่ $n \neq 1$ พบว่าหากทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-X)^{1-n}$ กับ เวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน (Process time) และสร้างสมการเส้นตรง โดยความชัน (Slope) มีค่าเท่ากับ $(n-1)k$ ดังนั้นจะสามารถหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(1-X)^{1-n}$ กับ เวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน

จากการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวในแต่ละอุณหภูมิทอรีแฟคชันจะได้ชุดของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) โดยทั่วไปสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิได้ด้วย Arrhenius Law ดังสมการที่ 3.11

$$k = A \exp \frac{-E_a}{RT} \quad (3.11)$$

โดยแปลงเป็นในเทอมของลอการิทึมได้ดังนี้

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (3.12)$$

เมื่อ	A	คือ pre-exponential factor (min^{-1})
	E_a	คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, J/mol)
	R	คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol K
	T	คือ อุณหภูมิในหน่วยของศาสมบรูณ์ (K)

จากนั้นนำชุดค่า k ในแต่ละชุดของอันดับปฏิกิริยา (n) ในทุกอุณหภูมิมารสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ T^{-1} เพื่อสร้างสมการเส้นตรง โดยที่ความชัน (Slope) มีค่าเท่ากับ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน x มีค่าเท่ากับ $\ln A$ ทำให้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) ค่า pre-exponential factor (A) สมการเส้นตรง (Regression line) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เพื่อนำมาใช้เลือกค่าอันดับปฏิกิริยา (n) ของตัวอย่างกากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

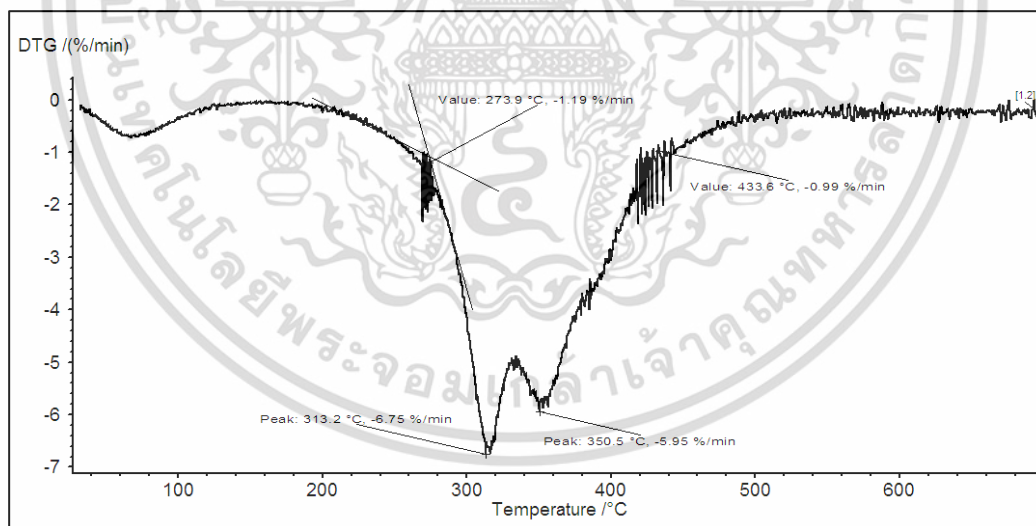
งานวิจัยนี้มีกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันเป็นตัวอย่างควบคุม จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟดังกล่าว มีการแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงดังตารางที่ 4.1

ค่าปริมาณกลุ่มสารแสดงปริมาณองค์ประกอบพื้นฐานของกากกาแฟและอธิบายพฤติกรรมการสลายตัวขององค์ประกอบที่อยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในกากกาแฟ (Ballesteros et al., 2014) โดยการวิเคราะห์กราฟอนุพันธ์ลำดับหนึ่ง (DTG) จากรูปที่ 4.1 พบว่า เฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ $272.25 \pm 2.33^\circ\text{C}$ และมีการสลายตัวสูงสุดที่ $315.45 \pm 3.18^\circ\text{C}$ ด้วยอัตราการสลายตัวสูงสุดคือ 6.81 ± 0.08 mg/min อุณหภูมิที่มีการสลายตัวสูงสุดขององค์ประกอบที่คาดว่าเป็นเซลลูโลสและลิกนิน คือ $352.95 \pm 3.49^\circ\text{C}$ ด้วยอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ 5.92 ± 0.05 mg/min และอุณหภูมิที่ลิกนินมีการสลายตัว คือ $428.85 \pm 0.64^\circ\text{C}$ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวบ่งบอกถึงอุณหภูมิที่มีผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวขององค์ประกอบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ในกากกาแฟ โดยการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $270 - 315^\circ\text{C}$ การสลายตัวของเซลลูโลสและลิกนินจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $350 - 430^\circ\text{C}$ ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Tsai and Liu (2013) ที่รายงานพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกากกาแฟ โดยช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินอยู่ที่ $227 - 300^\circ\text{C}$ และ $300 - 397^\circ\text{C}$ ตามลำดับ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงผลว่าตัวอย่างควบคุมมีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Todaka et al., 2016 และค่าความร้อนสูง มีค่าเท่ากับ 25.02 ± 0.07 MJ/kg ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Barbanera and Muguerza (2020) ซึ่งรายงานผลค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันไว้ที่ 25.3 ± 0.5 MJ/kg

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

สมบัติเชิงพลังงาน	กากกาแฟที่ไม่ผ่าน กระบวนการทอรีแฟคชั่น
ค่าการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) (%)	
ความชื้น	5.70±0.27
คาร์บอนคงตัว	13.88±0.15
สารระเหย	79.85±0.14
เถ้า	0.58±0.02
ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) (%)	
คาร์บอน	56.42
ไฮโดรเจน	8.06
ไนโตรเจน	1.66
ออกซิเจน	33.42
ซัลเฟอร์	0.15
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	25.02±0.07



รูปที่ 4.1 กราฟอนุพันธ์ลำดับหนึ่ง (DTG) ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น

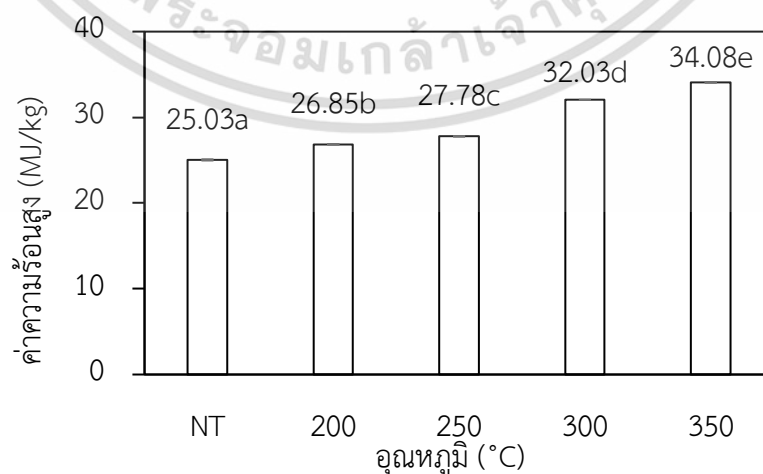
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ

กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 200, 250, 300 และ 350 °C ที่ระยะเวลาของกระบวนการ 30 min ถูกนำมาวิเคราะห์ห่อิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อค่าความร้อนสูง, Solid yield, Enhancement factor และ Energy yield โดยมีผลวิเคราะห์ดังนี้

4.2.1 ค่าความร้อนสูง

ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟแสดงอยู่ในรูปที่ 4.2 โดยเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของกากกาแฟตัวอย่างควบคุม (non-torrefied sample, NT) พบว่ากากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันมีค่าความร้อนสูงมากกว่าและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอรีแฟคชันสามารถช่วยเพิ่มค่าความร้อนสูงของกากกาแฟได้ เนื่องจากขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชัน กากกาแฟมีการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นผลให้ปริมาณของไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความร้อนสูงมากขึ้น (Tsai and Liu, 2013) หากเปรียบเทียบกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่ายิ่งอุณหภูมิทอรีแฟคชันสูงขึ้น ค่าความร้อนสูงยิ่งมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าสูงกว่าค่าที่รายงานในงานวิจัยของ Buratti et al, 2018 ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันเดียวกัน (31.68 MJ/kg) ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคและสายพันธุ์ของกาแฟที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยดังกล่าวใช้กากกาแฟที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 500 μm และใช้กาแฟสายพันธุ์ Robusta และ Arabica และเมื่อเปรียบเทียบกับไม้สน (Patula Pine) ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 425 μm ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันในทุกอุณหภูมิ (Ramos et al, 2017) พบว่าค่าความร้อนสูงของกากกาแฟมีค่าสูงกว่า กากกาแฟจึงถือเป็นแหล่งชีวมวลที่มีศักยภาพสูง

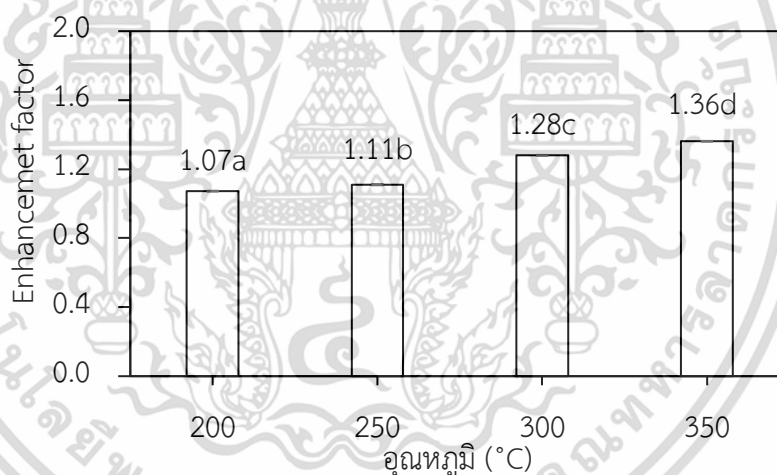


รูปที่ 4.2 ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 Enhancement factor

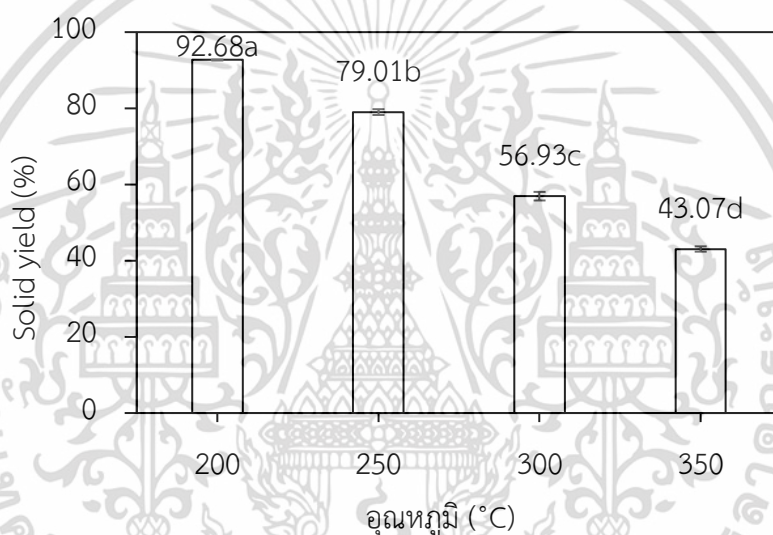
ค่า Enhancement factor เป็นตัวเลขแสดงสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นเมื่อเปรียบเทียบกับกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น โดยให้กากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นมีค่า Enhancement factor เท่ากับ 1 เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.3 พบว่าที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวของกากกาแฟ ($272.25 \pm 2.33^\circ\text{C}$) นั่นคือ 200 และ 250°C มีค่า Enhancement factor เท่ากับ 1.07 และ 1.11 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงจากค่าความร้อนสูงของกากกาแฟตัวอย่างควบคุมเพียง 7 และ 11% ตามลำดับ ขณะที่ค่า Enhancement factor เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อตัวอย่างผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวของกากกาแฟ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เฮมิเซลลูโลสมีการสลายตัว ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 300 และ 350°C ทำให้ได้กากกาแฟที่มีค่า Enhancement factor เท่ากับ 1.28 และ 1.36 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่ามีความร้อนสูงเพิ่มขึ้นถึง 28 และ 36% ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ค่า Enhancement factor ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.3 Solid yield

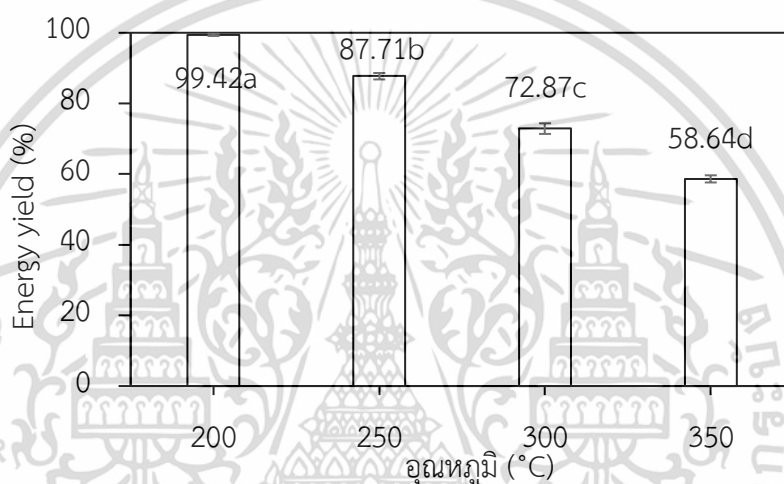
กระบวนการทอรีแฟคชันมีอิทธิพลเชิงลบต่อปริมาณ Solid yield ของกากกาแฟ เนื่องจากอุณหภูมิทอรีแฟคชันที่สูงทำให้ค่า Solid yield ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ค่า Solid yield ที่มากที่สุดได้จากอุณหภูมิทอรีแฟคชันที่ 200°C คือ 92.68% โดยผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ที่แสดงการสลายตัวของกากกาแฟที่อุณหภูมิ 220 - 310°C ทำให้ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชันที่ 300 และ 350°C มีค่า Solid yield ต่ำลง คือ 56.93 และ 43.07% ตามลำดับ การลดลงของปริมาณ Solid yield อาจเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งทำให้บางส่วนเกิดการคาร์บอนิเซชันและการระเหยของผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำมันดิน (Tar) ที่ได้จากส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของกากกาแฟ (Tsai and Liu, 2013)



รูปที่ 4.4 ค่า Solid yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.4 Energy yield

Energy yield เป็นค่าที่ใช้อธิบายพลังงานกักเก็บที่อยู่ในกากกาแฟหลังจากผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น ซึ่งองค์ประกอบบางส่วนของกากกาแฟจะสลายไปและทำให้ค่า Energy yield ลดลง (Basu, 2018) ดังรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูง องค์ประกอบของกากกาแฟจะมีการสลายตัวมาก เป็นผลให้เกิดการสูญเสียมวลมาก เนื่องจาก Energy yield เป็นค่าที่มีการคำนวณโดยใช้ค่า Solid yield และ Enhancement factor จึงเป็นผลให้ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 350°C มีค่า Energy yield ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al, 2018 ที่รายงานแนวโน้มที่ลดลงของ Energy yield อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น



รูปที่ 4.5 ค่า Energy yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ

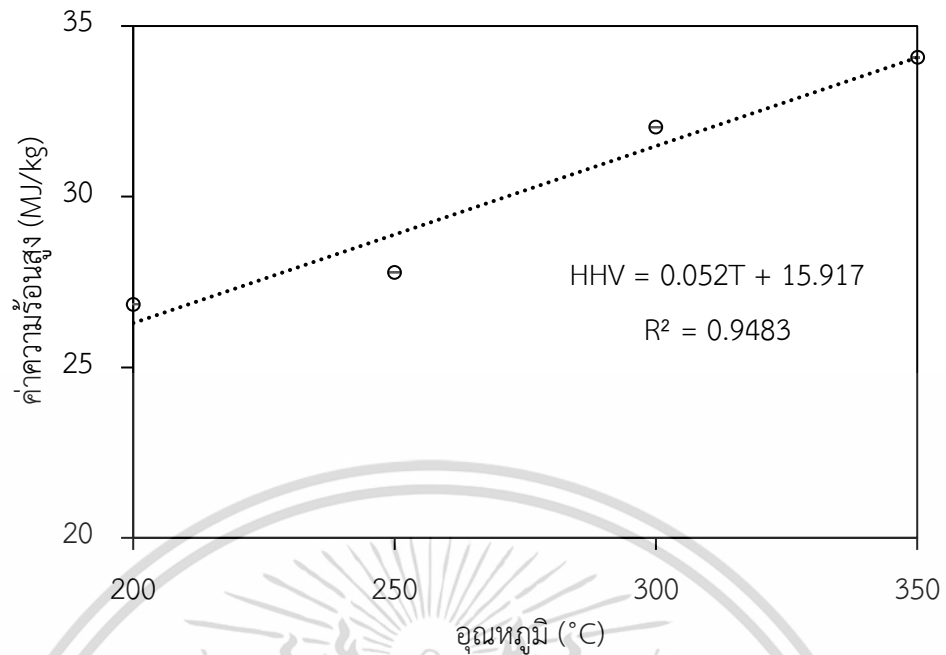
4.2.5 สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชันกับสมบัติเชิงพลังงาน

สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชันกับสมบัติเชิงพลังงานต่างๆ ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันแสดงในตารางที่ 4.2 ด้วย Pearson's correlation coefficients พบว่าอุณหภูมิทอรีแฟคชันมีความความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความร้อนสูงและ Enhancement factor แต่มีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงลบกับ Solid yield และ Energy yield โดยพบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงกว่า 0.9 สำหรับทุกคู่การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชันกับค่าสมบัติเชิงพลังงาน แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติด้านพลังงานทั้งหมดของกากกาแฟนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของกระบวนการและสามารถทำนายสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันได้จากอุณหภูมิทอรีแฟคชัน รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงสมการเชิงเส้นทำนายค่าความร้อนสูงและ Energy yield จากอุณหภูมิทอรีแฟคชันโดยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นค่าพารามิเตอร์แสดงสมรรถนะของสมการทำนาย ซึ่งสมการทำนายทั้งสองสมการมีค่า R^2 เกินกว่า 0.9

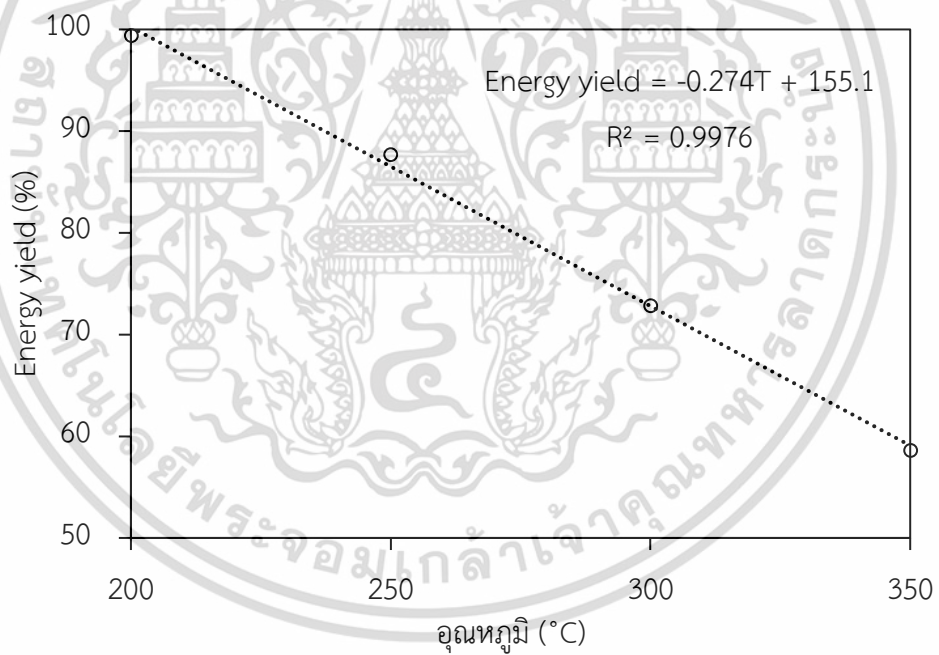
ตารางที่ 4.2 Pearson's correlation coefficients ในแต่ละค่าพารามิเตอร์

	Temperature	HHV	Enhancement factor	Solid yield	Energy yield
HHV	0.974*				
Enhancement factor	0.974*	1.000**			
Solid yield	-0.995**	-0.989*	-0.990*		
Energy yield	-0.999**	-0.982*	-0.982*	0.997*	

* และ ** หมายถึงนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูงและอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และสมการถดถอย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Energy yield และอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และสมการถดถอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 จลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแพ

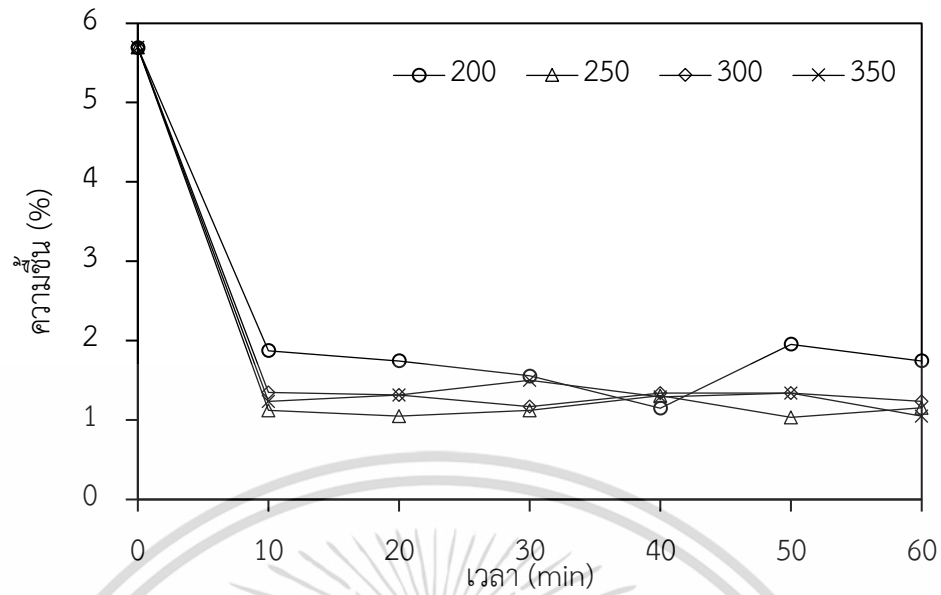
จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อคุณสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแพในหัวข้อ 4.2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิทอรีแฟคชันมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของกากกาแพ ดังนั้น ในการศึกษาหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาในเชิงลึกเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของกากกาแพเชิงจลนพลศาสตร์อันเนื่องมาจากอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยมีรายละเอียดผลการวิจัยดังนี้

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

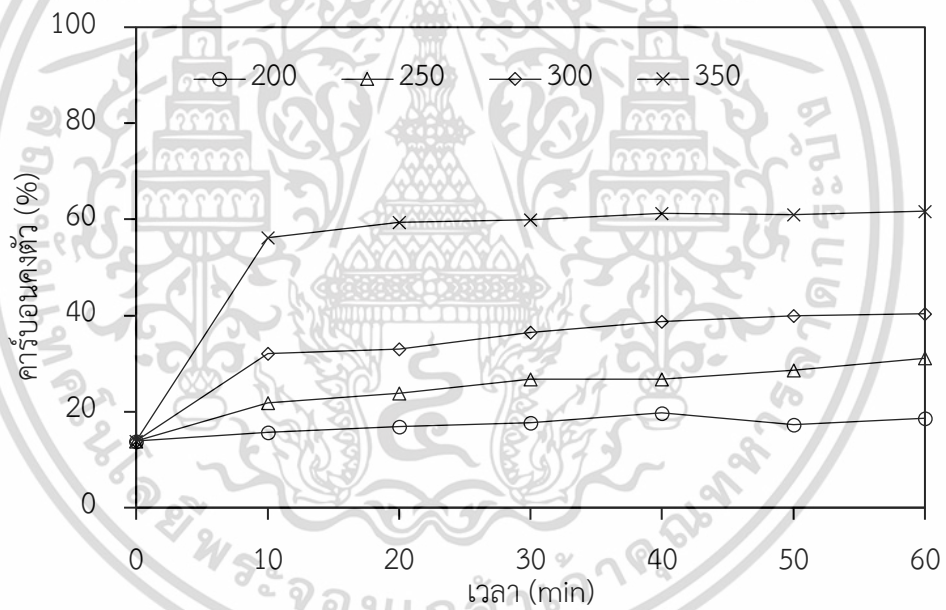
1) การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร

เมื่อเกิดกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลด้วยความร้อน องค์ประกอบภายในชีวมวลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดการสลายตัวในบางส่วน โดยที่น้ำและสารระเหยจะมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาของกระบวนการที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่คาร์บอนคงตัวและเถ้าจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยผลวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของกากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.8 – 4.11 แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้น คาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้าของกากกาแพเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวและการลดลงของสารระเหยเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยตลอดกระบวนการเมื่อให้กระบวนการทอรีแฟคชันกับกากกาแพที่อุณหภูมิต่ำ 200°C ซึ่งบ่งชี้ว่าอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชันระดับอ่อน (light torrefaction) นี้แทบจะไม่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวและสารระเหยเลย ขณะที่กระบวนการทอรีแฟคชันระดับรุนแรง (severe torrefaction) ที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะที่ 350°C ส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกลุ่มสารที่วิเคราะห์ทุกค่า หากเปรียบเทียบระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน เห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิมิมีบทบาทมากกว่าเวลาของกระบวนการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกลุ่มสาร ค่าปริมาณกลุ่มสารจะเริ่มคงที่หลังจากกระบวนการทอรีแฟคชันผ่านไป 20 - 30 min

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด คุณสมบัติของชีวมวลที่ไม่ได้ทำด้วยไม้และประเภทไม้ไม่ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (มอก. 2772–2560) ปริมาณความชื้นเถ้า และค่าความร้อนสูงของกากกาแพในงานวิจัยนี้เป็นไปตามเงื่อนไขชั้นคุณภาพ 1 (ตารางที่ 4.3)

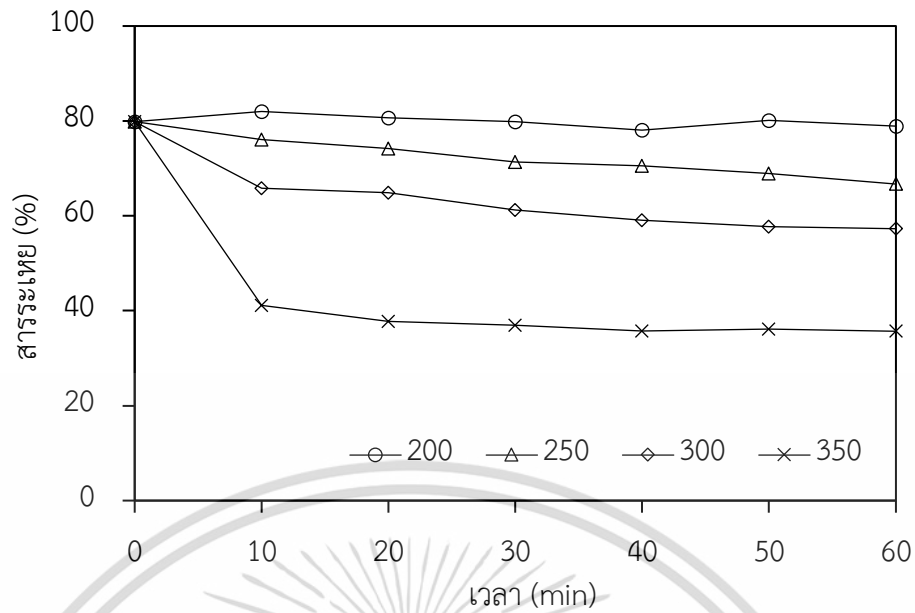


รูปที่ 4.8 ปริมาณความชื้นของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

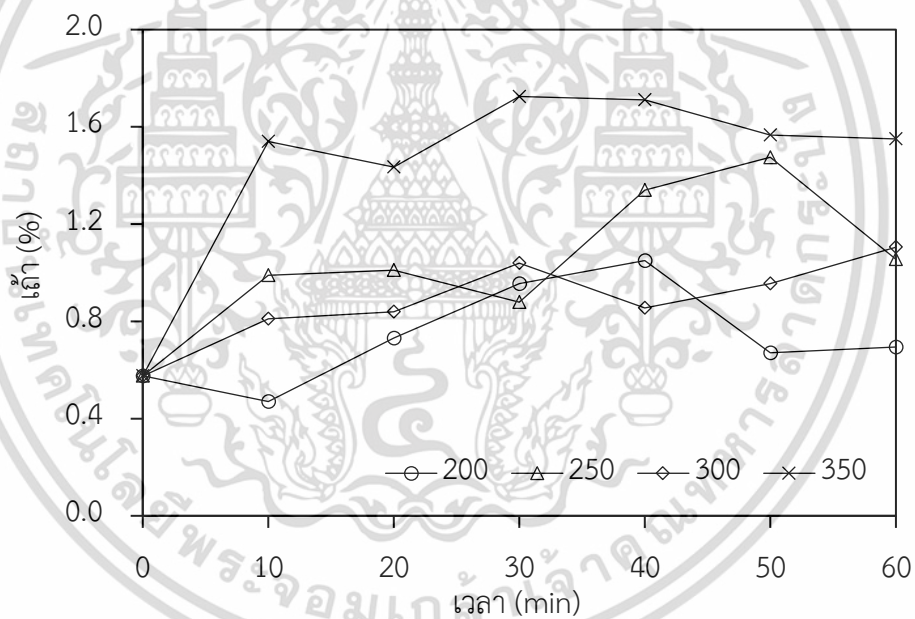


รูปที่ 4.9 ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ปริมาณสารระเหยของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.11 ปริมาณเถ้าของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

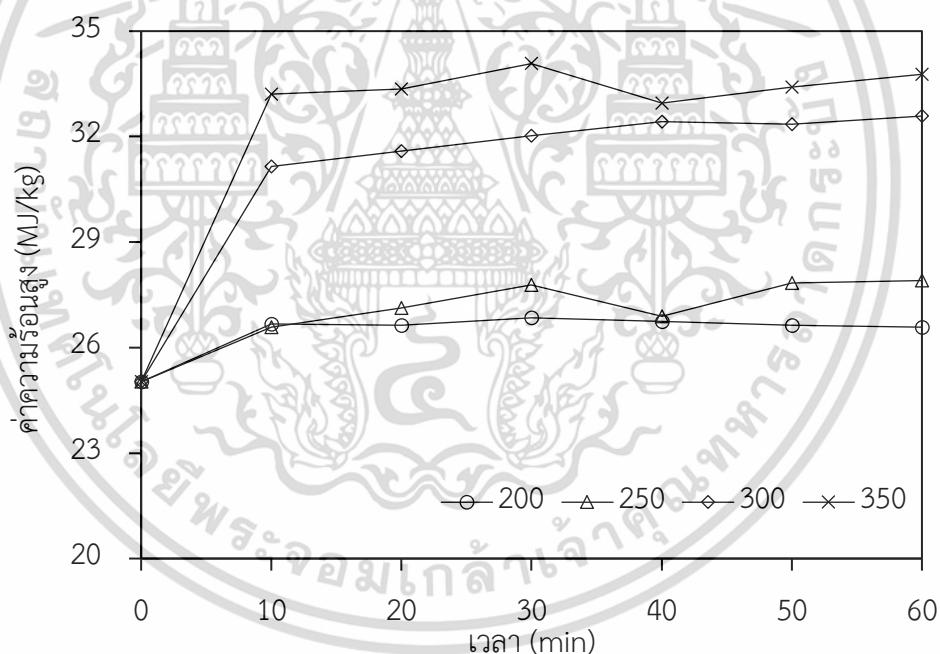
ตารางที่ 4.3 สรุปคุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้และประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด (มอก. 2772-2560)

คุณลักษณะที่ต้องการ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2
ความชื้น	ไม่เกิน 15 % w/w	ไม่เกิน 15 % w/w
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 14.5 % w/w	ไม่น้อยกว่า 14.5 % w/w
เถ้า	ไม่เกิน 10 % w/w	ไม่เกิน 18 % w/w

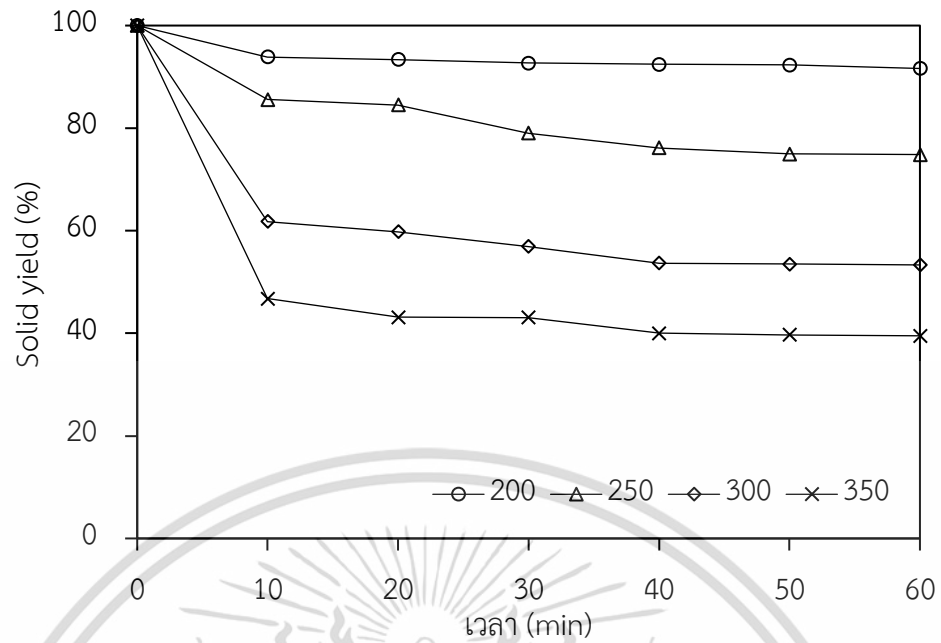
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลังงาน

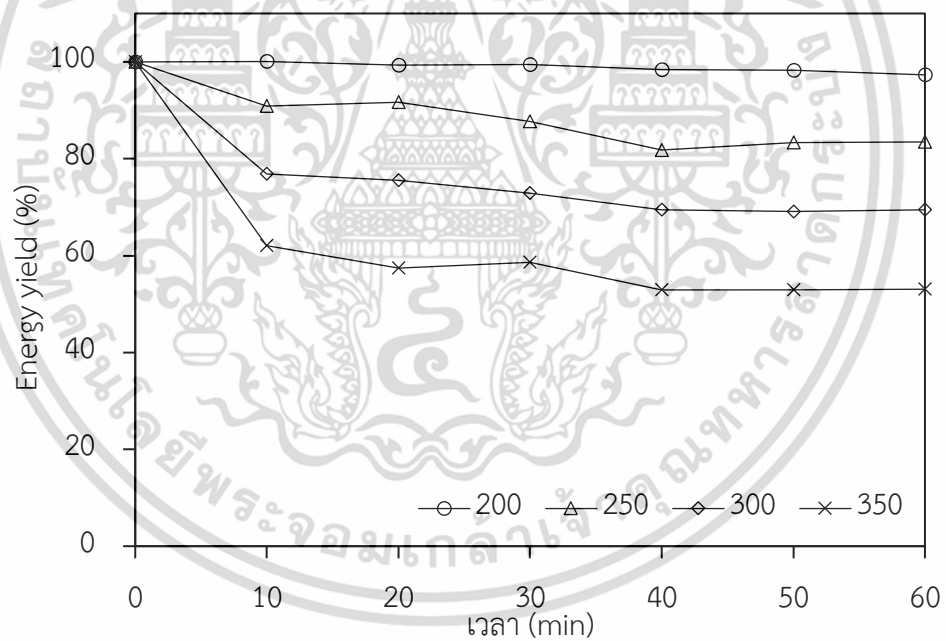
การเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนสูง, Solid yield และ Energy yield ของตัวอย่างกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.12 – 4.14 พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูง เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาของกระบวนการเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า Enhancement factor ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ขณะที่ค่า Solid yield จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชันมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร กระบวนการทอรีแฟคชันระดับอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C ให้การเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนสูง, Enhancement factor, Solid yield และ Energy yield ของกากกาแฟเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ขณะที่กระบวนการทอรีแฟคชันระดับรุนแรงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงพลังงานเหล่านี้อย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2014) ที่ศึกษากระบวนการทอรีแฟคชันของสาหร่ายขนาดเล็ก



รูปที่ 4.12 ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.13 ค่า Solid yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.14 ค่า Energy yield ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

เมื่อนำตัวอย่างกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันในแต่ละอุณหภูมิที่ระยะเวลาของกระบวนการ 30 min ซึ่งเลือกมาเป็นตัวแทนสำหรับการวิเคราะห์ มาวิเคราะห์แบบแยกธาตุเพื่อแสดงสัดส่วน H/C และ O/C (ตารางที่ 4.4) พบว่าเมื่ออุณหภูมิทอรีแฟคชันสูงขึ้น ปริมาณของไฮโดรเจนและออกซิเจนจะมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวขององค์ประกอบกากกาแฟขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยมีค่าสัดส่วน H/C และ O/C อยู่ระหว่าง 0.08 – 0.13 และ 0.16 – 0.57 ในขณะที่กากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน มีค่าสัดส่วน H/C และ O/C เท่ากับ 0.14 และ 0.59 โดยค่าสัดส่วนที่ได้นี้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Tsai and Liu (2013) ที่ทำกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟที่อุณหภูมิ 230 – 350°C เป็นเวลา 10 min ได้รายงานค่าสัดส่วน H/C และ O/C ว่าเท่ากับ 0.07 – 0.12 และ 0.38 – 0.66 ตามลำดับ

เมื่อนำค่าสัดส่วน H/C และ O/C มาทำสร้างจุดในกราฟ Van Krevelen ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน H/C กับสัดส่วน O/C เพื่อใช้แสดงผลและเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเชื้อเพลิง (Wyn et al., 2019) โดยค่าสัดส่วน H/C และ O/C ที่ลดลงแสดงถึงสมบัติของชีวมวลที่ใกล้เคียงกับถ่านหินเมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรีแฟคชัน จากกราฟ Van Krevelen ของถ่านหิน กากกาแฟ กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน และชีวมวลอื่นๆ (รูปที่ 4.15) แสดงค่าสัดส่วน H/C และ O/C ของถ่านหิน Anthracite คือ 0.03 และ 0.06 และของถ่านหิน Bituminous คือ 0.07 และ 0.15 (Baxter et al., 2005) จะพบว่ากากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันในงานวิจัยนี้มีค่าสัดส่วน H/C และ O/C ที่ใกล้เคียงกับถ่านหิน และมีสมบัติดีกว่าวัสดุทางการเกษตรอื่นๆ เช่น ทางใบปาล์ม (Oil palm frond, OPF) มีค่าสัดส่วน H/C และ O/C เท่ากับ 1.57 และ 0.92 ต้นกระถิน (*Leucaena Leucocephala*, LL) มีค่าสัดส่วน H/C และ O/C เท่ากับ 1.75 และ 0.57 (Matali et al., 2016) และวัสดุทางการเกษตรที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันแล้ว เช่น ต้นถั่วแระ (pigeon pea stalk) ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่ 250°C เป็นเวลา 30 min มีค่าสัดส่วน H/C และ O/C เท่ากับ 0.14 และ 0.78 (Sing et al., 2019) และโอ๊คแดงที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่ 300°C เป็นเวลา 30 min มีค่าสัดส่วน H/C และ O/C เท่ากับ 0.09 และ 0.62 (Carrasco et al., 2013)

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าสัดส่วน H/C และ O/C ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 min

ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) (%)	อุณหภูมิทอรีแฟคชัน (°C)			
	200	250	300	350
คาร์บอน	57.23	61.82	76.31	76.18
ไฮโดรเจน	7.45	7.61	7.38	6.06
ไนโตรเจน	1.90	2.00	3.05	4.02
ออกซิเจน	32.84	27.99	12.43	12.91
ซัลเฟอร์	0.16	0.15	0.16	0.17
สัดส่วน H/C	0.13	0.12	0.10	0.08
สัดส่วน O/C	0.57	0.45	0.16	0.17



รูปที่ 4.15 กราฟ Van Krevelen ของถ่านหิน กากกาแฟ กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน และชีวมวลอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 สมรรถนะการแยกสลายด้วยความร้อน

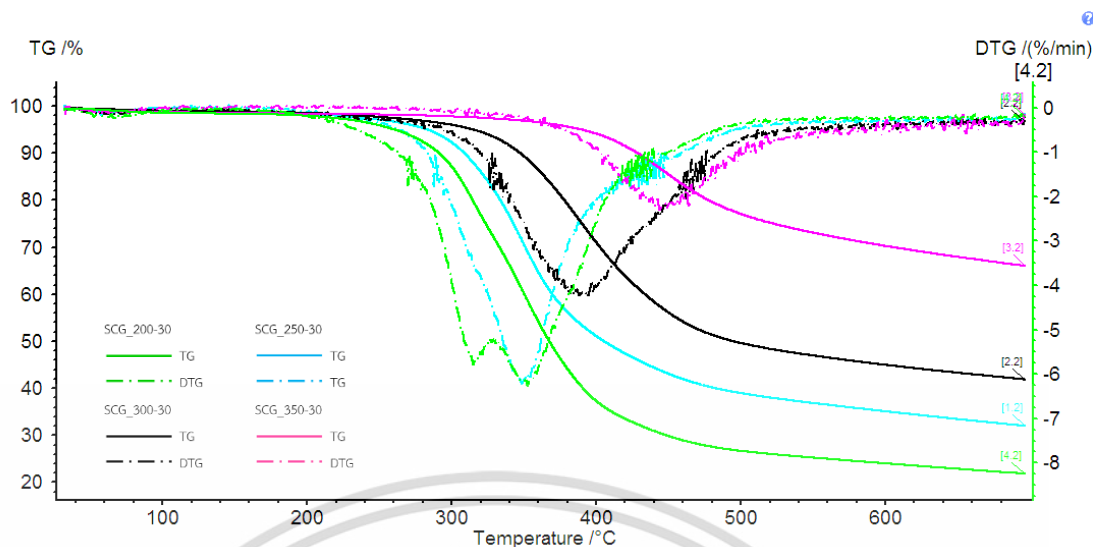
กากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันถูกวิเคราะห์สมรรถนะการแยกสลายด้วยความร้อนจากกราฟองค์ประกอบเชิงปริมาณ (TGA) และกราฟอนุพันธ์ลำดับหนึ่ง (DTG) (รูปที่ 4.16) โดยใช้ตัวอย่างกากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันทั้ง 4 อุณหภูมิ ระยะเวลากระบวนการ 30 min ซึ่งเป็นระยะเวลาต่ำสุดที่แนะนำสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน (Nunes et al., 2018) เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1) กากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน 200 °C พบว่าเฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 270.15±0.21 °C และมีการสลายตัวสูงสุดที่ 315.75±1.06 °C ด้วยอัตราการสลายตัวสูงสุดคือ 5.85±0.04 mg/min อุณหภูมิที่มีการสลายตัวสูงสุดขององค์ประกอบที่คาดว่าเป็นเซลลูโลสและลิกนินคือ 353.08±0.78 °C ด้วยอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ 6.34±0.01 mg/min และสำหรับลิกนินที่มีช่วงอุณหภูมิสลายตัวที่ค่อนข้างกว้าง พบอุณหภูมิที่ลิกนินมีการสลายตัว คือ 420.60±2.40 °C

2) กากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน 250 °C พบว่าเฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 287.55±1.77 °C อุณหภูมิที่มีการสลายตัวสูงสุดขององค์ประกอบที่คาดว่าเป็นเซลลูโลสและลิกนินคือ 349.80±1.84 °C ด้วยอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ 6.31± 0.06 mg/min และอุณหภูมิที่ลิกนินมีการสลายตัว คือ 419.95±4.03 °C

3) กากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน 300 °C คาดว่าเฮมิเซลลูโลสได้เกิดการสลายตัวแล้วขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชัน (Yang et al., 2007) กราฟจึงแสดงการเริ่มสลายตัวของเซลลูโลสตัวที่อุณหภูมิ 338.55±17.11 °C อุณหภูมิที่มีการสลายตัวสูงสุดขององค์ประกอบที่คาดว่าเป็นเซลลูโลสและลิกนินคือ 386.55±1.91 °C ด้วยอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ 4.45± 0.03 mg/min และอุณหภูมิที่ลิกนินมีการสลายตัว คือ 468.80±7.50 °C

4) กากกาแพที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน 350 °C คาดว่าเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสได้สลายตัวแล้วขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชัน กราฟจึงแสดงอุณหภูมิที่มีการสลายตัวของลิกนินคือ 444.05±0.07 °C ด้วยอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ 2.39± 0.06 mg/min ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Burhenne et al., 2013 ที่ทำการวิเคราะห์สมรรถนะการแยกสลายด้วยความร้อนของไม้สนและเปลือก คาดว่าเกิดการสลายตัวของลิกนินที่อุณหภูมิ 417 - 607 °C



รูปที่ 4.16 องค์ประกอบเชิงปริมาณ (TG) และกราฟอนุพันธ์ลำดับหนึ่ง (DTG) ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นระยะเวลา 30 min

4.3.3 ดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชั่น (Torrefaction severity index, TSI)

ดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชั่น (TSI) แสดงถึงระดับการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวลในระหว่างกระบวนการทอรีแฟคชั่น คำนวณได้จากสัดส่วนของค่าการสูญเสียมวลที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระบวนการแฟคชั่นที่สภาวะหนึ่ง (weight loss increment, ΔWI) เทียบกับสภาวะอ้างอิง (ΔWI_{ref}) ซึ่งในงานวิจัยนี้ จากช่วงอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่ศึกษา สภาวะที่ให้ค่า ΔWI มากที่สุด คือ อุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 350°C และระยะเวลาของกระบวนการ 40 min ดังนั้น จึงใช้สภาวะนี้เป็นสภาวะอ้างอิง

จากการสังเกตอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นต่อค่า ΔWI ในตารางที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ค่า ΔWI มีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามระยะเวลา นั่นคือ กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 200°C ระยะเวลา 60 min มีค่า ΔWI เพิ่มขึ้นเพียงประมาณ 2% จากที่ระยะเวลา 10 min ขณะที่ค่า ΔWI จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิทอรีแฟคชั่นสูง ดังเช่นที่ 300°C ที่ระยะเวลา 60 min มีค่า ΔWI เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 8% จากที่ระยะเวลา 10 min ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นที่ส่งผลต่อการสูญเสียมวลของกากกาแฟขณะเกิดกระบวนการทอรีแฟคชั่น

กราฟ 3 มิติ ในรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น ระยะเวลาของกระบวนการ และ TSI จาก Chen et al. (2014) ยิ่งความโค้งของกราฟมาก กระบวนการยิ่งส่งผลต่อการสูญเสียมวลของชีวมวลมากขึ้น งานวิจัยนี้ได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน โดยที่ตลอดอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น 200°C ไม่ว่าจะเป็นเวลาของกระบวนการใด จะพบว่าความโค้งของกราฟ 3 มิติอยู่ในระดับต่ำ

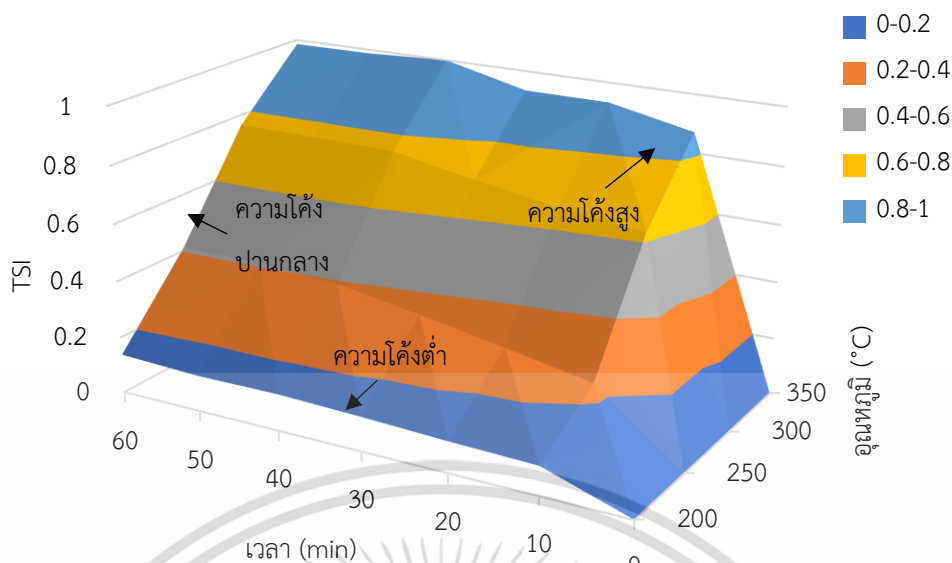
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ตลอดเวลาของกระบวนการ 60 min จะพบความโค้งของกราฟอยู่ในระดับปานกลาง แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 350°C ที่เวลาสั้น จะพบว่าความโค้งของกราฟสูงมาก ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการนี้ส่งผลต่อการสูญเสียมวลของชีวมวลอย่างมาก แสดงว่ากระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่ากระบวนการทอรีแฟคชันที่ระยะเวลานานโดยใช้อุณหภูมิอื่นๆ ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.5 ค่าการลดลงของมวลที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดกระบวนการแฟคชันที่สภาวะหนึ่ง (ΔWI) Solid yield และค่าดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชัน

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ΔWI (%)	TSI
200	10	6.12	0.10
	20	6.61	0.11
	30	7.32	0.12
	40	7.86	0.13
	50	7.69	0.13
	60	8.37	0.14
250	10	14.44	0.24
	20	17.82	0.29
	30	20.99	0.34
	40	23.96	0.39
	50	25.07	0.41
	60	25.15	0.41
300	10	38.24	0.63
	20	40.17	0.66
	30	43.07	0.70
	40	46.34	0.76
	50	46.53	0.76
	60	46.67	0.76
350	10	53.23	0.87
	20	56.88	0.93
	30	56.93	0.93
	40	61.11	1.00
	50	60.31	0.99
	60	60.14	0.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟ 3 มิติแสดงลักษณะของดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ

4.3.4 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชัน

จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง Isothermal torrefaction kinetics กับกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟที่อุณหภูมิ 4 ระดับ และระยะเวลาของกระบวนการ 6 ระดับ เมื่อนำค่า k ในแต่ละชุดของอันดับปฏิกิริยา (n) ในทุกอุณหภูมิมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ T^{-1} (K) เพื่อสร้างสมการเชิงเส้น และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) โดยค่า R^2 (ตารางที่ 4.6) ถูกใช้เป็นพารามิเตอร์ตัดสินอันดับปฏิกิริยาของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองพบว่าที่ค่า $n=4$ มีค่า R^2 สูงสุด จึงถูกเลือกเป็นค่าอันดับปฏิกิริยาของกระบวนการ และจากความชันและจุดตัดแกนของสมการเชิงเส้นที่ $n=4$ (รูปที่ 4.18) ทำให้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) และค่า pre-exponential factor (A) ดังตารางที่ 4.7 ค่าพลังงานกระตุ้นและค่า pre-exponential factor ของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟมีค่าเท่ากับ 0.94 kJ/mol และ $33,289.59 \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ โดยค่าพลังงานกระตุ้นเป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนพลังงานที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยากระบวนการนั้นๆ จึงสามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟต้องการพลังงานกระตุ้นเพียง 0.94 kJ/mol เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่ากระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟในงานวิจัยนี้ใช้พลังงานกระตุ้นต่ำมาก ดังเช่นงานวิจัยของ Chen et al. (2014) ที่ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของสาหร่ายขนาดเล็กจำนวน 2 สายพันธุ์ ได้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 97.90 kJ/mol และ 174.74 kJ/mol แสดงถึงความต้องการพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกันในแต่ละชีวมวล

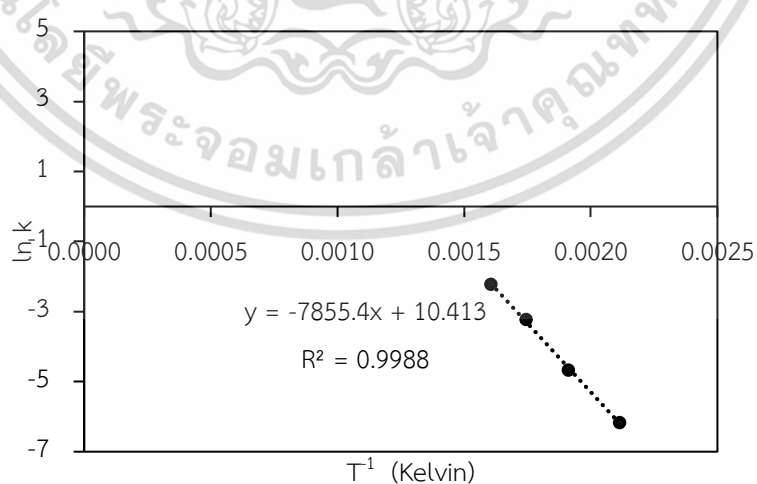
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ

อันดับปฏิกิริยา (n)	R^2
1	0.9848
2	0.9926
3	0.9977
4	0.9988
5	0.9974
6	0.9949
7	0.9918
8	0.9887
9	0.9858

ตารางที่ 4.7 สมบัติของจลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ

สมบัติทางจลนพลศาสตร์	ชีวมวลกากกาแฟ
n	4
R^2	0.9988
Regression line	$\ln k = -7855.4/T + 10.413$
E_a (kJ/mol)	0.94
A (min^{-1})	33,289.59



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ T^{-1} (K) ที่อันดับปฏิกิริยา 4 ของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาผลการทดลองเพื่อแนะนำอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการทอรีแพคชั้นกากกาแฟ พบว่ากระบวนการทอรีแพคชั้นกากกาแฟทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลามีค่าความร้อนสูง ปริมาณความชื้น และเถ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) และเมื่อพิจารณาจากค่า TSI หากกำหนดเกณฑ์การเลือกค่า TSI ที่เหมาะเท่ากับ 0.8 (Yen et al., 2021) จะพบว่าที่อุณหภูมิ 350 °C มีค่า TSI สูงกว่า 0.8 ในทุกระยะเวลาของกระบวนการ เมื่อพิจารณากราฟ 3 มิติแสดงลักษณะของดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแพคชั้นกากกาแฟ (รูปที่ 4.17) ที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 350 °C พบว่าในช่วงเวลา 30 min แรกมีการเปลี่ยนแปลงของค่า TSI สูง แสดงถึงความไม่เสถียรและอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อกระบวนการ ในขณะที่เวลา 40 – 60 min ค่า TSI ค่อนข้างคงที่ นอกจากนั้นที่เวลา 40 min ยังเป็นเวลาที่มีค่า ΔWI สูงสุด แสดงถึงการลดลงของมวลกากกาแฟสูงสุดในกระบวนการ และเมื่อพิจารณาร่วมกับความเหมาะสมในแง่การใช้พลังงานจึงควรเลือกเวลา 40 min ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำทอรีแพคชั้นกากกาแฟที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานคือกระบวนการทอรีแพคชั้นที่ 350 °C 40 min

สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิทอรีแฟคชันต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟ

อุณหภูมิทอรีแฟคชันส่งผลต่อสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 200 – 350 °C ค่าความร้อนสูง, Enhancement factor, Solid yield และ Energy yield อยู่ในช่วง 26.85-34.08 MJ/kg, 1.07-1.36, 92.68-43.07% และ 99.42-58.64% ตามลำดับ กระบวนการทอรีแฟคชันสามารถทำให้ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟเพิ่มขึ้นได้สูงสุดถึง 36% เมื่อเทียบกับกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ซึ่งมีค่าความร้อนสูง 25.03 MJ/kg แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอรีแฟคชันสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ อุณหภูมิทอรีแฟคชันและสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟยังมีสหสัมพันธ์กันด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า 0.9 สำหรับทุกคู่การเปรียบเทียบ สามารถทำนายค่าความร้อนสูงและค่า Energy yield โดยใช้อุณหภูมิทอรีแฟคชัน (T) ที่ทราบค่าได้ดังสมการ $HHV = 0.052T + 15.917$ ($R^2 = 0.9483$) และ $Energy\ yield = -0.274T + 155.1$ ($R^2 = 0.9976$)

5.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ

อุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชันที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในของกากกาแฟที่ต่างกัน จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่ต่างกันด้วย อุณหภูมิและเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชันระดับอ่อน (light torrefaction) 200 °C แทบจะไม่มีผลต่อสมบัติเชิงพลังงานทุกค่าที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันขึ้นไปจนถึงสูงสุด 350 °C (กระบวนการทอรีแฟคชันระดับรุนแรง – severe torrefaction) พบว่าสมบัติเชิงพลังงานเกิดจากเปลี่ยนแปลงไปจากสมบัติเชิงพลังงานของกากกาแฟที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันอย่างมาก ค่าสัดส่วน H/C และ O/C ของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันเท่ากับ 0.08 – 0.13 และ 0.16 – 0.57 แสดงถึงคุณสมบัติของกากกาแฟที่เปลี่ยนแปลงไปโดยมีแนวโน้มเข้าใกล้ถ่านหินมากขึ้น ค่าดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟที่อุณหภูมิ 350 °C อยู่ในช่วง 0.87 – 1.00 ขณะที่ลดลงเหลือประมาณ 0.71, 0.35 และ 0.12 โดยเฉลี่ยที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน 300, 250 และ 200 °C ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะของดัชนีความรุนแรงของกระบวนการทอรีแฟคชันบ่งชี้ว่ากระบวนการ

ทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นเหมาะสมกว่ากระบวนการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิต่ำระยะเวลา นาน จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมบัติเชิงพลังงานของกระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟ ด้วยแบบจำลอง Isothermal torrefaction kinetics ที่อุณหภูมิ 4 ระดับและระยะเวลาของ กระบวนการ 6 ระดับ พบว่ากระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟมีอันดับปฏิกิริยา 4 โดยมีค่า R^2 สูงสุด 0.9988 มีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.94 kJ/mol และค่า pre-exponential factor เท่ากับ และ $33,289.59 \text{ min}^{-1}$ และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำทอรีแฟคชันกากกาแฟในงานวิจัยนี้โดย พิจารณาจากค่า TSI และการใช้พลังงานคือกระบวนการทอรีแฟคชันที่ 350°C 40 min

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการทอรีแฟคชันกากกาแฟในรูปแบบผง ไม่มีการผสมกับ ชีวมวลอื่นๆหรือขึ้นรูปเป็นชีวมวลอัดแท่งก่อนการทดลอง ซึ่งหากมีการผสมชีวมวลอื่นๆหรือขึ้นรูปเป็น ชีวมวลอัดแท่งอาจจะเป็นการเพิ่มศักยภาพของชีวมวลได้ดียิ่งขึ้น
2. ควรทำการศึกษาวิเคราะห์ Optimization ของกระบวนการทอรีแฟคชันเพื่อเลือกสภาวะที่ เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ในการทำในกรณีที่ต้องการประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. (2014). Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee. *Food Bioprocess Technol*, 7, 3493-3503.
- Barbanera, N., Muguerza, I.F. (2020) Effect of the temperature on the spent coffee grounds torrefaction process in a continuous pilot-scale reactor. *Fuel*, 262, 116493
- Basu, P. (2018). Torrefaction. In Biomass gasification pyrolysis and torrefaction, (pp. 93-154). Academic Press.
- Baxter, L., Ip, L., Lu, H., & Tree, D., (2005). Distinguishing biomass combustion characteristics and their implications for sustainable energy. 5th Asia-Pacific Conference on Combustion.
- Buratti, C., Barbanera, M., Lascaro, E., & Cotana, F. (2018). Optimization of torrefaction conditions of coffee industry residues using desirability function approach. *Waste Management*, 27, 523-534.
- Burhenne, L., Messmer, J., Aicher, T., Laborie, M.-P. (2013) The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, 177-184
- Calorimeter System C 200 Operating instructions. IKA: Author
- Carrasco, J. C., Oporto, G. S., Zondlo, J., & Wangm, J. (2013). Torrefaction Kinetics of Red Oak (*Quercus rubra*) in a Fluidized Reactor. *BioResource*, 8(4), 5067-5082.
- Chen, W.-H., Huang, M.-Y., Chang, J.-S., & Chen, C.-Y. (2014). Thermal decomposition dynamics and severity of microalgae residues in torrefaction. *Bioresource Technology*, 169, 258-264.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Chen, W.-H., Wu, Z.-Y., & Chang, J.-S. (2014). Isothermal and non-isothermal torrefaction characteristics and kinetics of microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresource Technology*, 155, 245-251.
- Daniel, C. (2010). *Renewable and Alternative Energy Fact Sheet: Characteristics of Biomass as a Heating Fuel*. Retrieved October 10, 2021 from PennState Extension
Web site: <https://extension.psu.edu/characteristics-of-biomass-as-a-heating-fuel>
- Eseyin, A. E., Steele, P. H., Pittman Jr, C.U., Ekpenyong, K. I., & Soni, B. (2013). TGA Torrefaction Kinetics of Cedar Wood. *Journal of Biofuels*, 7(1), 20-27.
- Grosso, J. (2017). An introduction to the nature of coal. In *Coal Combustion Products (CCP's) Characteristic, Utilization and Beneficiation* (pp. 5). Woodhead Publishing.
- Heldman, D. R. (2011). *Food Preservation Process Design*. Academic Press.
- Hu, J., Song, Y., Liu, J., Evrendilek, F., Buyukada, M., Yan, Y., et al. (2020). Combustions of torrefaction-pretreated bamboo forest residues. *Bioresource Technology*. 304, 122960
- Irawan, A., Upe S, L., & I.P., M.D. (2017). Effect of Torrefaction Process on the Coconut Shell Energy Content for Solid Fuel. *Renewable Energy Technology and Innovation for Sustainable Development*, 1826, 020010
- Kopczynski, M., Pills, A., & Zuwała, J. (2015). Thermogravimetric and kinetic analysis of raw and torrefied biomass combustion. *Chemical and Process Engineering*, 36(2), 209-223.
- Lee, J., Sarmah, A. K., & Kwon, E. E. (2019). Production and Formation of Biochar. In *Biochar from Biomass and Waste* (pp. 3-18). Elsevier

- Lu, K.-M., Lee, W.-J., Chen, W.-H., & Lin, T.-C. (2013). Thermogravimetric analysis and kinetics of co-pyrolysis of raw/torrefied wood and coal blends. *Applied Energy*, 105, 57-65.
- Martín-Lara, M.A., Ronda, A., Zamora, M.C., Calero, M. (2017) Torrefaction of olive tree pruning: Effect of operating conditions on solid product properties. *Fuel*, 202, 109-117
- Matali, S., Rahman, N. R., Idris, S.S., Taccob, N., & Alias, A.B. (2016). Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction. *Procedia Engineering*, 148, 671-678.
- Nunes, L. J. (2017). Biomass Torrefaction Process. In *Torrefaction of Biomass for Energy Applications* (pp. 89-124). Academic Press.
- Ramos, S., Perez, J. F., Pelaez-Samaniego, M., Barrera, R., & Garcia-Perez, M., (2017). Effect of torrefaction temperature on properties of patula pine. *Maderas-Cienc Tecnol.* 19(1)
- Todaka, M., Kowhakul, W., Masamoto, H., & Shigematsu, M. (2016). Thermal analysis and dust explosion characteristics of spent coffee grounds and jatropha. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 538-543.
- Tsai, W.-T. & Liu, S.-C. (2013). Effect of temperature on thermochemical property and true density of torrefied coffee residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 102, 47-52.
- Van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., & Ptasinski, K.L. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 3748-3762.
- Yang, H., Yan, H., Chen, H., Ho, L. D., & Zheng, C. (2007). Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.

Yen, S.-W., Chen, W.-H., Eng, C.-F., Naqvi, S. R., Show, P. L., (2021) Torrefaction Thermogravimetric Analysis and Kinetics of Sorghum Distilled Residue for Sustainable Fuel Production *Sustainability*, 13, 4246

Zhang, C., Hom S.-H., Chen, W.-H., Xie, Y., Liu, Z., & Chang, J.-S. (2018). Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. *Applied Energy*, 220, 598-604.

กรมพัฒนาธุรกิจการค้า. (2562). ธุรกิจผลิตกาแฟ. บทวิเคราะห์ธุรกิจประจำเดือนมกราคม 2562. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 มกราคม 2563 Web site: https://dbd.go.th/download/document_file/Statistic/2562/T26/T26_201901.pdf

กรมวิชาการเกษตร. (2562). ยุทธศาสตร์กาแฟ ปี 2560-2564. เข้าถึงเมื่อวันที่ 7 มีนาคม 2563 Web site: <https://www.doa.go.th/hort/wp-content/uploads/2019/11/ยุทธศาสตร์กาแฟปี2560-2564.pdf>

กระทรวงพลังงาน. ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีเพาะปลูก พ.ศ. 2556. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2563 Web site: <https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีเพาะปลูก%20%20พ.ศ.%2556.pdf>

กระทรวงพลังงาน. (2564). สรุปสถานการณ์พลังงานในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2564. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม 2565 Web site: <https://www.energynewscenter.com/สรุปสถานการณ์พลังงาน-ใน/>

กระทรวงพลังงาน. (2565). ภาพรวมพลังงาน เดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ 2565. เข้าถึงเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม 2565 Web site: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/18125-monthly-02-2022>

จิรัฏฐ์ วรรณโชติ, เพ็ญภา ตรีชนะ, และอินธิรา น้อยปิ่น (2561). การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของกระถินเทพาโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.

เจนจิรา อุตเรือน, นิกราน หอมดวง, ณิชฎฐ์กิจจ ก้อยผ่านกิ,จ ชูรัตน์ ธารารักษ์, และณิชฎฐ์ คุชฎี (2530). การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทาง

การเกษตร.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศกสิทธิ์ จินดารักษ์, ชูรัตน์ ธารารักษ์, เสริมสุข บัวเจริญ, นิกราน หอมดวง, ภาคนน ปินตานา, และณัฐวดี ดุษฎี (2562). การเพิ่มคุณภาพทางใบปาล์มด้วยกระบวนการทอรีรีแฟคชัน จากคลื่นไมโครเวฟ. การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 วันที่ 6-8 พฤศจิกายน 2562, 317-322.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

Natthanant Bangkha, Wanphut Saechua, Tharathip Nuamyakul, and Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen. (2020). Effect of torrefaction temperature on energy properties of spent coffee ground. TSAE 2020. E3S Web of Conferences 187, 03009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018703009>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of torrefaction temperature on energy properties of spent coffee ground

Natthanant Bangkha¹, Wanphut Saechua¹, Tharathip Nuamyakul¹, and Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen^{1*}

¹King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Department of Agricultural Engineering, Thailand

Abstract. The aim of this research was to investigate the effect of torrefaction temperature on 4 energy properties as high heating value (HHV), enhancement factor, solid yield, and energy yield of spent coffee ground (SCG). Four different torrefaction temperatures (200, 250, 300, and 350°C) were selected. Torrefaction process was conducted at the heating rate of 10°C/min. HHV and enhancement factor were the highest when SCG was torrefied at the highest temperature of 350°C. However, at this temperature, solid and energy yields were the lowest. Torrefaction temperature highly affected these four energy properties with R of higher than 0.9. Regression models representing the relationship between torrefaction temperature and HHV and energy yield were $HHV = 0.0519T + 15.917$, $R^2 = 0.9483$ and $energy\ yield = -0.2743T + 155.1$, $R^2 = 0.9976$. These models are helpful for prediction of the energy properties of SCG undergoing torrefaction process in the studied temperature range.

1 Introduction

Biomass is a natural energy resource which can be used as a substitute for fossil fuel. It may come from agricultural wastes such as rice straw, coconut shell, bagasse or energy crops as Napier grass. Biomass can be divided into three types based on the states of matter: liquid, solid and gaseous fuels as follows. Liquid fuels include ethanol, biodiesel, pyrolysis oil, etc. Solid fuels include charcoal, torrefied biomass, biochar, etc. Gaseous fuels include biogas (CH₄, CO₂) and syngas (CO, H₂) [1].

Coffee is one of agricultural crops that is consumed worldwide. The important cultivation areas of coffee are in Brazil, Vietnam, Colombia and Indonesia, which constitute 66% of the total world export. Thailand ranks 6th in instant coffee export. Coffee businesses in Thailand have grown and expanded, and new coffee business increased 37.71% comparing with 2017 [2]. When coffee demanding increases, wastes are also increased subsequently. High heating value (HHV) of spent coffee ground (SCG) with low moisture content (3.16% wb) is 21.77 MJ/kg [3], which is higher than HHV of lignite (14.65-19.30 MJ/Kg) [4]. It is obvious that SCG is a good source of heat energy.

* Corresponding author: jiraporn.jo@kmitl.ac.th

Torrefaction is a pre-treatment process of biomass. Under torrefaction process, bonded and unbonded moisture and volatile fraction (mostly hemicellulose and some of lignin) release and turn into solid. Torrefied biomass generally composes of cellulose and lignin which provide higher carbon content in relative to original biomass [5]. Torrefaction is therefore becoming a significant process for refining woody biomass or industry residue for energy improvement [6].

According to previous works, the effect of torrefaction temperature on thermochemical properties and true density of torrefied coffee residue showed carbon content increased mostly at torrefied temperature range 290 to 320°C [7]. Matali et al. [8] studied the influence of torrefaction process parameters on physico-chemical properties of two biomass materials, i.e. oil palm frond (non-woody biomass) and *Leucaena Leucocephala*, and found that if the torrefaction temperature increased, their energy content raised, but mass reduced.

In this work, SCG was subjected to torrefaction process at the different temperatures from 200 to 350°C. The aim of this work was to investigate the effect of torrefaction temperature on energy properties of SCG, including HHV, enhancement factor, solid yield, and energy yield. Correlations and relationships among the torrefaction temperature and energy properties were also determined.

2 Materials and methods

2.1 Material preparation

SCG (66±2% wb), Robusta variety, was provided by Khao Shong Industry 1979 Co., Ltd. (Samutprakarn, Thailand). It was dried in a hot air oven (ULM 500, Memmert GmbH+Co.KG, Schwabach, Germany) at 105°C until the moisture content was 5±2% wb. Then, the dried SCG was sieved through a 425-µm mesh screen in order to obtain particle size lower than 425 µm based on prior research of torrefied SCG which was in the range of 400 to 500 µm [3],[7]. The sieved SCG was kept in an air-tight container at room temperature prior to further experiments.

2.2 Thermogravimetric analysis

SCG (20±1 mg) was filled in an aluminum oxide (Al₂O₃) crucible and placed in a thermogravimetric analyzer (TG209F3 Tarsus, Netzsch, Germany). Firstly, the sample was maintained at 33°C for 5 min. Then, the temperature was increased to 700°C with the constant heating rate of 10°C/min and hold at this temperature for 30 min. After that, oxygen gas was purged for 15 min in order to complete the combustion process. Data of weight loss versus temperature were obtained and used to describe thermal decomposition behaviour of SCG.

2.3 Torrefaction process

To prepare torrefied SCG, 5±1 g of SCG sample was filled into a crucible and placed in an electric furnace (JSMF-45T, JSR, Korea). In the first stage of the process, the sample was dried at 105°C for 1 h. Then, the crucible was covered and the temperature of the furnace was increased with the heating rate of 10°C/min to the predetermined torrefaction temperature (200, 250, 300, and 350°C). The torrefaction duration was 30 min. After completing the torrefaction process, the sample was left inside the desiccator to be cooled down to ambient temperature and used for further analysis.

2.4 High heating value measurement

HHV of SCG was measured using a bomb calorimeter (C200, IKA, Germany) in isoperibol mode at room temperature. In this mode, the HHV measurement was conducted at the constant temperature of bomb calorimeter and surrounding environment [9]. After the combustion process, released heat from the sample caused temperature change and the temperature difference was used to evaluate the HHV. HHV of non-torrefied SCG was also determined as a control sample.

2.5 Enhancement factor

Enhancement factor was used to define energy output of torrefied biomass in relative to non-torrefied biomass. It can be calculated using Equation (1).

$$\text{Enhancement factor} = \text{HHV}_{\text{torrefied SCG}} / \text{HHV}_{\text{non-torrefied SCG}} \quad (1)$$

2.6 Solid yield

Solid yield was defined as the weight ratio of biomass undergoing the torrefaction process and raw biomass as shown in Equation (2).

$$\text{Solid yield (\%)} = (\text{Weight}_{\text{torrefied SCG}} / \text{Weight}_{\text{non-torrefied SCG}}) \times 100 \quad (2)$$

2.7 Energy yield

Energy yield was used to describe the energy retention of biomass and can be calculated as follows:

$$\text{Energy yield (\%)} = \text{Solid yield} \times \text{Enhancement factor} \quad (3)$$

2.8 Statistical analysis

All the experiments were triplicated. Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan's New Multiple Range test were used for hypothesis testing of mean at the 95% confidence level. Pearson's correlation coefficients were determined to describe the relationship between two factors. Linear regression analysis was used to create prediction models between torrefaction temperature and HHV and energy yield of SCG. Performance of the prediction models was indicated by coefficient of determination (R^2) [9].

3 Results and discussion

3.1 Thermal behaviour

Thermal decomposition behaviour of biomass can be represented by percent residual mass of the material as a function of decomposition temperature. The residual mass data of SCG reflects its chemical composition and are very helpful to describe other energy properties of the SCG. TGA curve of SCG of this study is shown in Figure 1. It is as expected, the thermal decomposition of SCG was a gradual process with different chemical decomposition stages. The first stage of about 5% mass loss, which was the loss of moisture and loose constituents, was observed from 33°C to 220°C. Thereafter, substantial drop in mass to below 40% was

observed in the second stage from 220°C to 400°C. These can be implied that this temperature range impacted on lignocellulosic structure of SCG. The decomposition of hemicellulose of SCG started from 220 to 310°C while the cellulose and lignin decomposition started from 350 to 430°C. Tsai and Liu [7] also reported similar thermal behaviour of SCG, hemicellulose and cellulose components degraded within the temperature range of 227-300°C and 300-397°C, respectively.

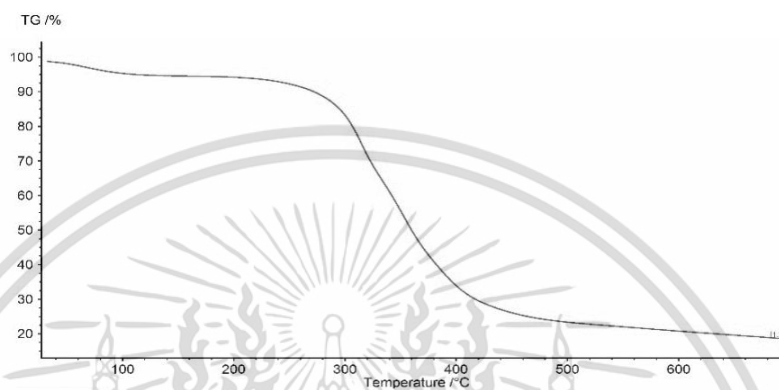


Fig. 1. TGA curve of non-torrefied SCG.

3.2 High heating value

HHV data of torrefied SCG are shown in Figure 2 with the HHV of non-torrefied SCG as a control. It was obviously seen that an increase in torrefaction temperature significantly resulted in an increase in HHV of SCG ($p \leq 0.05$) while the non-torrefied SCG gave the lowest HHV. This result proved that torrefaction process helped enhancing HHV, which was the heat released by complete combustion of fuel. The reason of an increase in HHV was the decrease in hydrogen and oxygen contents and increase in carbon content when decomposing the SCG during the torrefaction process [7]. It is interesting that HHV of torrefied SCG obtained in this study (32.03 MJ/kg) was higher than those reported by Buratti et al. [5] (31.68 MJ/kg) at the same temperature of 300°C.

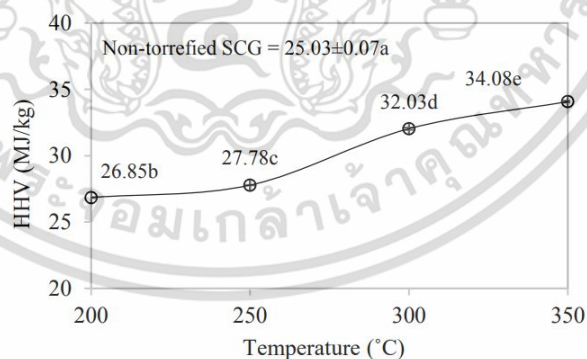


Fig. 2. HHV of torrefied SCG as a function of torrefaction temperature.

3.3 Enhancement factor

Increased HHV of torrefied SCG as compared to HHV of non-torrefied SCG can be presented in term of enhancement factor. As shown in Figure 3, at the torrefaction temperature lower than the decomposition temperature of SCG, i.e. 200°C, the enhancement factor was only 1.07. High enhancement factors could be clearly obtained by torrefaction of SCG at the temperature higher than 300°C as its hemicellulose was decomposed and carbon content was increased as shown in the TGA data described above.

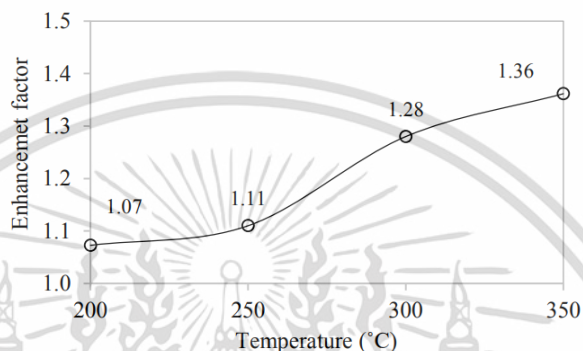


Fig. 3. Enhancement factor of torrefied SCG as a function of torrefaction temperature.

3.4 Solid yield

Effect of torrefaction temperature on solid yield of SCG is shown in Figure 4. Negative relationship between torrefaction temperature and solid yield was observed. The highest solid yield of about 93% was obtained at the lowest torrefaction temperature of 200°C. This result was correspondent to what provided by TGA that biomass decomposition started at the process temperature of 220-310°C, which is higher than 200°C. By the way, the solid yields of SCG at the torrefaction temperature of 300°C and 350°C were 56.93% and 43.07%, respectively. These may be the depolymerization of hemicellulose, which led to partial carbonization and volatilization of tar products derived from the lignocellulosic components of coffee residue [7]. TGA curves could be used to describe the results of low solid yields at these conditions as well. At 300°C, hemicellulose degradation occurred and caused great amount of weight loss.

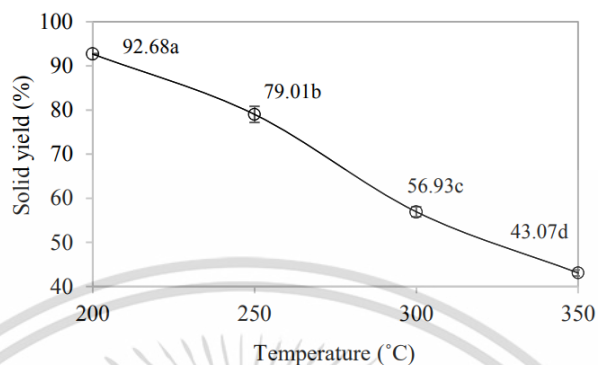


Fig. 4. Solid yield of torrefied SCG as a function of torrefaction temperature.

3.5 Energy yield

Energy yield is a term to describe energy retention of torrefied biomass. After the torrefaction process, some energy components lose and lead to lower energy yield of the biomass [1]. According to Figure 5., The energy yield decreased due to the decomposition of biomass under the torrefaction process, i.e. higher torrefaction temperature, higher amount of mass losses. Based on Equation (1) of 2.3 for energy yield calculation, energy yield mostly depends on mass yield value [8], thus the torrefaction temperature of 350°C, gave both the lowest solid yield and energy yield. According to the previous experiment of Zhang et al. [3], similar trend of decreased energy yield with an increase in torrefaction temperature was observed.

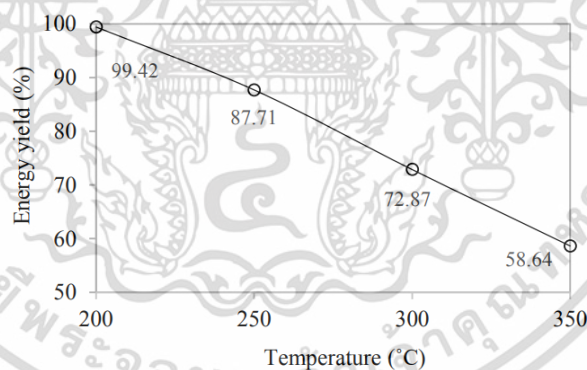


Fig. 5. Energy yield of torrefied SCG as a function of torrefaction temperature.

3.5 Correlation among torrefaction temperature and energy properties

The relationships between torrefaction temperature and different energy properties of torrefied SCG are shown in Table 1. in terms of Pearson correlation coefficients. Torrefaction temperature was positively correlated with HHV and enhancement factor, but negatively

correlated with solid yield and energy yield. The correlation coefficients of higher than 0.9 for each pair of torrefaction temperature and the other energy parameter were obtained. This suggests that all the energy properties of SCG were substantially dependent on the torrefaction temperature. The energy properties of torrefied SCG could be predicted using the torrefaction temperature. Regression plots between torrefaction temperature and HHV and energy yield are presented in Figure 6 and Figure 7, respectively. The prediction models are shown in the plots with high coefficient of determination, which confirms that the HHV and energy yield can be accurately determined using the torrefaction temperature.

Table 1. Pearson correlation coefficients among different parameters.

	Temperature	HHV	Enhancement factor	Solid yield	Energy yield
HHV	0.974*				
Enhancement factor	0.974*	1.000**			
Solid yield	-0.995**	-0.989*	-0.990*		
Energy yield	-0.999**	-0.982*	-0.982*	0.997*	

* and ** means the correlations are significant at $p < 0.05$ and $p < 0.01$ levels, respectively.

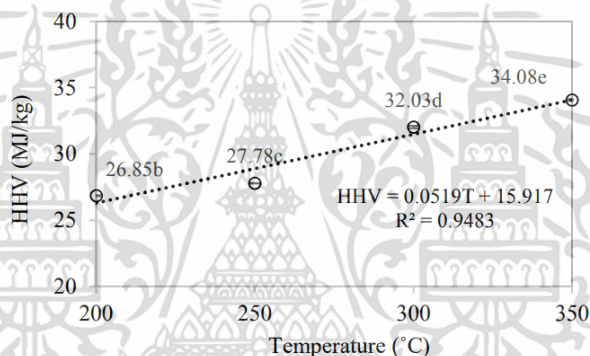


Fig. 6. Regression model of HHV and torrefaction temperature.

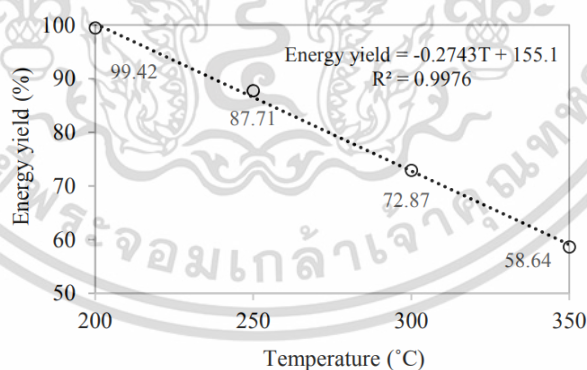


Fig. 7. Regression model of energy yield and torrefaction temperature.

4 Conclusions

At the torrefaction temperature of 200-350°C, HHV, enhancement factor, solid yield, and energy yield of SCG were in the ranges of 26.85-34.08 MJ/kg, 1.07-1.36, 92.68-43.07%, and 99.42-58.64%, respectively. HHV of torrefied SCG was higher than non-torrefied SCG, which was 25.03 MJ/kg. It is significant that torrefaction process could enhance energy properties of SCG. High correlation coefficients of over 0.9 were obtained between torrefaction temperature and every energy parameter. Regression models for predicting HHV and energy yield using know torrefaction temperature were generated with high coefficient of determinations of over 0.9 as well.

The author thanks Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for laboratory supports.

References

1. P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Academic Press, 2018)
2. Unknown, Coffee production business, D.o.B. Development, (2019)
3. C. Zhang, S. Ho, W. Chen, Y. Xie, Z. Liu, J.Chang. Applied Energy. **220**, 598-604. (2018)
4. J. Groppo, Coal Combustion Products (CCP's), (Woodhead Publishing, 2017)
5. C. Buratti, M. Barbanera, E. Lascaro, F. Cotana. Waste Management. **73**, 523-534. (2018)
6. A. Eseyin, P. Steele, C. Pittman Jr., K. Ekpenyong. Journal of Biofuels. **7** (2016)
7. W.-T. Tsai, S.-C. Liu, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. **102**,47-52. (2013)
8. S. Matali, N.A. Rahman, S.S. Idris, N. Yaacob, A.B. Alias. Procedia Engineering, **148**,671-679. (2016)
9. J. Posom. Rapid analysis of energy characteristic of biomass using near infrared spectroscopy. (2017)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวณัฐนันท์ บางคำ
วัน เดือน ปีเกิด	11 เมษายน 2537
ที่อยู่	71/143 หมู่บ้านพฤษวีวิลด์ (1) ถนน รามอินทรา ซอย 5 แยก 18 แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220
ประวัติการศึกษา	
ปี 2558	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (เกียรตินิยมอันดับ 2)
ประวัติการทำงานและงานวิจัย	
ปี 2558	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารไนโบปาล์มน้ำมันโดยเนียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี
ปี 2559	วิศวกรรมออกแบบโครงสร้าง บริษัท มิตรชูบิชิ อิเล็กทริก คอนซุมเมอร์ โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด
ปี 2561	วิศวกรจัดซื้อ บริษัท ฮอนด้า ออโตโมบิล (ประเทศไทย) จำกัด
ปี 2563	นักวิชาการศุลกากรปฏิบัติการ กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้