



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การวิเคราะห์พลังงานจากการทอริแฟกชันของกากกาแฟสำหรับการเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ENERGY ANALYSIS OF TORREFACTION FOR SPENT COFFEE GROUNDS AS A SOLID FUEL

รัฐพงศ์ ภิรมย์ภู และ คณิต มานะบุระ*

Rathapong Pirompoo and Kanit Manatura*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University,

Kamphaeng Saen campus, Nakornpatom 73140

Received: 5 December 2019

Revised: 11 June 2020

Accepted: 17 July 2020

Available online: 7 December 2020

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์คุณสมบัติการทอริแฟกชันและประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกากกาแฟอัดเม็ดภายใต้อุณหภูมิ (200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (30, 45 และ 60 นาที) ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยใช้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Energy Efficiency, REE) เป็นดัชนีบ่งบอกประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการปรับปรุงชีวมวล ผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทอริแฟกชันส่งผลให้อัตราส่วนอะตอมของ H/C และ O/C ผลผลิตเชิงมวล และผลผลิตเชิงพลังงานมีค่าลดลง ขณะที่ความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิทอริแฟกชันสูง (275 ถึง 300 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาทอริแฟกชันที่สั้น (30 นาที) มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าที่อุณหภูมิทอริแฟกชันต่ำ (200 ถึง 250 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาสั้น (60 นาที) ซึ่งการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที มีค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 28.2 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่สุด

คำหลัก: ทอริแฟกชัน กากกาแฟ ผลผลิตเชิงพลังงาน ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์

Abstract

Analysis of torrefaction characteristics and energy utilization of coffee grounds residue under the combination of temperature (200, 250, 275 and 300 °C) and duration (30, 45 and 60 minutes) is studied. An index of relative energy efficiency (REE) is introduced to identify the performance of energy utilization for upgrading biomass. Results showed increasing torrefaction temperature lead to low H/C, O/C, mass yield, energy yield which contrast with energy density. Moreover, the energy utilization under the combination of a high temperature (275 to 300 °C) and a short duration (30 minute) is more efficient than that of a low temperature (200 to 250 °C) and a long duration (60 minute). Torrefaction at 300 °C and 30 minute shows HHV of 28.2 MJ/kg, the optimum choice for REE.

Keywords: Torrefaction: Spent coffee grounds: Energy yield: REE

*ติดต่อ: kanitmana@gmail.com, 034-355-310

1. บทนำ

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เกิดจากธรรมชาติ และเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินได้ [1] เชื้อเพลิงดังกล่าวส่วนมากนำมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อาทิ แกลบ ชานอ้อย ชัง ข้าวโพด ฟางข้าว เศษไม้ กากปาล์ม และกากมันสำปะหลัง พลังงานจากชีวมวลได้รับการคาดว่าจะจะเป็น 1 ใน 4 ของพลังงานหลักที่จะใช้ในประเทศไทย [2] ชีวมวลนอกจากถูกใช้ในการผลิตทางความร้อนและไฟฟ้าแล้ว ยังช่วยลดปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกอีกด้วย จากข้อมูลของสมาคมกาแฟ [3] ในปี 2559 ประเทศไทยมีการบริโภคกาแฟถึง 120,000 ตันต่อปี ผลผลิตที่ได้หลังจากการนำไปบริโภคแล้ว คือ กากกาแฟ โดยทั่วไปจะถูกนำไปทิ้ง ใช้ในการทำปุ๋ย ชัดผิว หรือใช้เป็นสารกำจัดกลิ่น อับ กากกาแฟโดยทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายกับชีวมวล กล่าวคือ มีความชื้นค่อนข้างสูง เนื่องจากการมีคุณสมบัติดูดความชื้นในบรรยากาศได้ดี (hygroscopic) และมีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ [4] ข้อเสียดังกล่าวสามารถถูกปรับปรุงโดยใช้การปรับสภาพทางความร้อนหรือการทอริแฟกชัน (Torrefaction)

กระบวนการทอริแฟกชัน เป็นกระบวนการปรับสภาพทางความร้อนกระบวนการหนึ่งใช้อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้อากาศหรืออากาศเบาบาง [5] ที่ความดันบรรยากาศ ความร้อนจะทำให้ส่วนประกอบหลักของชีวมวล ประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เกิดการสลายตัวในอัตราต่างๆกัน การทอริแฟกชันสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ตามระดับช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ การทอริแฟกชันชนิดเบาบางหรือ light torrefaction (200 – 235°C) การทอริแฟกชันชนิดอ่อนหรือ mild torrefaction (235 – 275 °C) และการทอริแฟกชันชนิดเข้มข้นหรือ severe torrefaction (275 – 300 °C) ตามลำดับ ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชันจะมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เปราะ (brittle) ค่าความร้อนและความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) สูงขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนเชิงอะตอมของ

ออกซิเจนต่อคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลง ผลจากการทอริแฟกชันช่วยปรับสภาพชีวมวลให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินบางชนิด [5]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทอริแฟกชันมีอย่างกว้างขวาง ดังนี้ Granados และคณะ [6] ศึกษาผลของการรับอิเล็คตรอนของโครงสร้างทางเคมีในชานอ้อยหลังผ่านกระบวนการทอริแฟกชัน พบว่า ชานอ้อยที่ผ่านการทอริแฟกชันมีคาร์บอนสูงขึ้น ไฮโดรเจนและออกซิเจนมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น 30% อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเชิงมวลลดลง เนื่องจากการมีสูญเสียมวลของไอน้ำและสารระเหยง่าย บางส่วนระหว่างเพิ่มอุณหภูมิทอริแฟกชัน ชีวมวลดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเชื้อเพลิงแข็ง เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหิน ผลจากการทอริแฟกชันดังกล่าวคล้ายคลึงกับงานของ Zhang และคณะ [7] ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของการทอริแฟกชันของกากกาแฟ ยาจีน และสาหร่ายขนาดเล็ก

Du และคณะ [8] ศึกษาการปรับปรุงชีวมวลที่ใช้กับเตาหลอม ผ่านการทอริแฟกชันและคาร์บอนไนเซชัน ผลศึกษาพบว่า ถ่านทอริไฟด์ ที่ 300 องศาเซลเซียส หรือถ่านจากการไพโรไลซิสระหว่าง 400 และ 500 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติที่ดีกว่าถ่านหินซึ่งมีสารระเหยง่ายน้อยและสามารถนำไปผสมกับถ่านหินบดละเอียดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับระบบเผาไหม้

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทอริแฟกชันโดยศึกษาผลของอุณหภูมิ (200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (30, 45 และ 60 นาที) ต่อสมรรถนะของการทอริแฟกชันในรูปของผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน และความหนาแน่นเชิงพลังงาน รวมถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานสัมพัทธ์ เพื่อหาเงื่อนไขการทอริแฟกชันที่เหมาะสม ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาเชื้อเพลิงถ่านหินร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวล

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชีวมวล

กากกาแฟที่เหลือจากร้านเครื่องดื่มภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการปรับปรุงสภาพทางความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ กากกาแฟดังกล่าวถูกทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน ชนิด Binder ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 7 ชั่วโมง จากนั้นนำมาขึ้นรูปโดยเครื่องอัดแท่งเพื่อให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงโดยมาผสมกับน้ำในอัตราส่วนระหว่างกากกาแฟต่อน้ำเท่ากับ 1 : 1.2 แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4 - 5 มิลลิเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 2 - 2.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำกากกาแฟแท่งเข้าเครื่องอบอีกครั้งเพื่อทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความเหนียวคงตัวมากขึ้นที่อุณหภูมิเฉลี่ย 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 7 ชั่วโมง แล้วจึงเก็บเชื้อเพลิงดังกล่าวไว้ในขวดโหลที่ปิดผนึกป้องกันความชื้น ก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

2.2 กระบวนการทอริแฟกชัน

รูปที่ 1 แสดงระบบการทอริแฟกชัน ประกอบด้วยถังแก๊สไนโตรเจน เตาทอริแฟกเตอร์ ระบบควบคุม และระบบกำจัดก๊าซเสีย ไนโตรเจนถูกใช้เพื่อให้สภาวะในถังปราศจากออกซิเจนตลอดการทอริแฟกชันโดยถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

เตาทอริแฟกเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 200 มิลลิเมตร สูง 500 มิลลิเมตร ทำจาก stainless steel ถูกควบคุมโดยระบบควบคุมและระบบกำจัดก๊าซเสียซึ่งประกอบด้วย บั๊ม และคอนเดนเซอร์เพื่อใช้ควบแน่นแก๊สให้อยู่ในรูปของเหลว

ในการทดลอง กากกาแฟแท่งจำนวน 100 กรัม ถูกใส่ในอุปกรณ์บ่อนก่อนนำลงในเตาทอริแฟกเตอร์ ภายในเตาถูกทำให้ปราศจากอากาศ โดยปล่อยแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลที่ 10 ลิตรต่อนาที ระยะเวลา 5 นาที เพื่อทำให้สภาวะในเตาปราศจากอากาศ หลังจากนั้นจึงลดอัตราการไหลของแก๊ส

ไนโตรเจนลงเหลือ 1 ลิตรต่อนาที เพื่อเริ่มการทดลอง เตาทอริแฟกเตอร์ได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์เพื่อให้ชีวมวลภายในเตามีอุณหภูมิเท่ากับ 200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ระยะเวลา 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาดังกล่าวทำให้ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานเพิ่มขึ้น [10] ถ่านชาร์ที่เหลือจากการทอริแฟกชันจะถูกเก็บไว้ในภาชนะปิดก่อนนำไปวิเคราะห์ค่าต่างๆ

2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุ

กากกาแฟก่อนและหลังการทอริแฟกชันถูกวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุ (Proximate and Ultimate Analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานของ ASTM D7582 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความชื้นและสารระเหย การวิเคราะห์แบบแยกธาตุใช้เครื่องวิเคราะห์ CHN analyzer ของบริษัท Leco รุ่น CHN 628 series เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และ ไนโตรเจน (N) ตามลำดับ โดยออกซิเจน (O) คำนวณจากผลต่างของ 100% และผลรวมของธาตุ C, H และ N

2.4 สมรรถนะการทอริแฟกชัน

สมรรถนะการทอริแฟกชันสามารถแสดงในรูปของผลผลิตเชิงมวล (Mass yield, MY) ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density, ED) และผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield, EY) ดังสมการต่อไปนี้

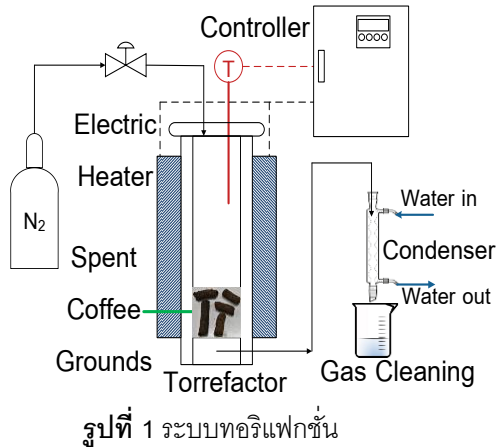
$$MY = \left(\frac{m_{\text{torrefied}}}{m_{\text{raw}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$ED = \frac{HHV_{\text{torrefied}}}{HHV_{\text{raw}}} \quad (2)$$

$$EY = MY \times ED \quad (3)$$

โดย m_{raw} และ $m_{\text{torrefied}}$ คือ มวลของกากกาแฟก่อนและหลังการทอริแฟกชัน (กรัม), HHV_{raw} และ $HHV_{\text{torrefied}}$ คือ

ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟก่อนและหลังการทอริแฟกชัน (MJ/kg) ตามลำดับ



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกากกาแฟ

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	55.73
ไฮโดรเจน (H)	6.92
ออกซิเจน (O)	34.92
ไนโตรเจน (N)	2.43
ค่าความร้อน (MJ/kg)	21.97

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 องค์ประกอบของกากกาแฟ

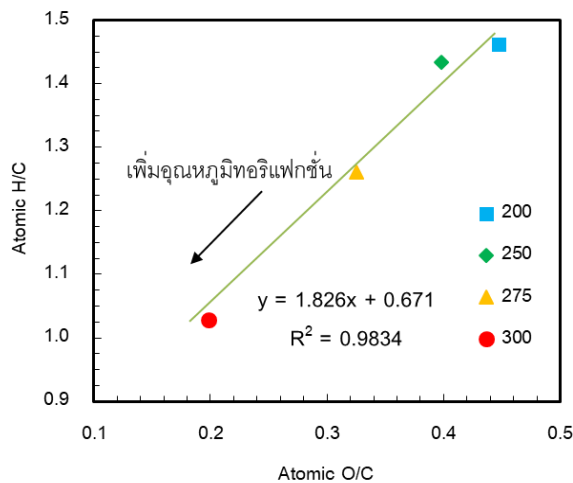
ผลการวิเคราะห์แบบปริมาณและแบบแยกธาตุของกากกาแฟแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากตารางที่ 1 พบว่า กากกาแฟมี C, O และ H เท่ากับ ร้อยละ 55, 34 และ 7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าธาตุ C มีปริมาณมากกว่าครึ่งหนึ่งขององค์ประกอบของกากกาแฟทั้งหมด ส่งผลให้กากกาแฟมีค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง (22 MJ/kg)

ตารางที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการทอริแฟกชันต่อองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟ จากตารางพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของธาตุในกากกาแฟมากกว่าระยะเวลาในการทอริแฟกชัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้ C มีปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณ O และ H มีค่าลดลง นอกจากนี้ธาตุ N

มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ C ที่มากที่สุดพบที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการระเหยของไอน้ำและสารระเหยง่ายในชีวมวล รวมถึงการสลายตัวของเส้นใยผ่านกระบวนการทอริแฟกชันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ [5]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่ผ่านการทอริแฟกชัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	200	250	275	300
คาร์บอน (C)				
30	56.73	58.56	63.00	71.51
45	57.02	59.70	64.36	73.92
60	57.60	64.72	70.11	78.59
ไฮโดรเจน (H)				
30	6.91	7.00	6.62	6.13
45	6.90	6.73	6.42	6.03
60	6.81	6.19	6.13	5.66
ไนโตรเจน (N)				
30	2.51	3.35	3.04	3.48
45	2.53	3.42	3.34	3.62
60	2.55	3.80	3.91	3.76
ออกซิเจน (O)				
30	33.85	31.10	27.34	18.89
45	33.55	30.15	25.88	16.43
60	33.04	25.29	19.84	11.99

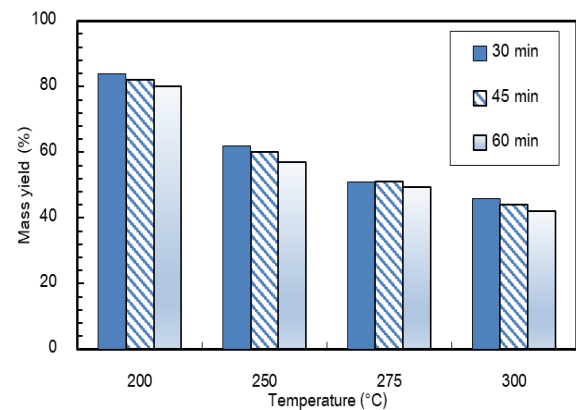


รูปที่ 2 ไดอะแกรมของ van Krevelen และเส้นถดถอยระหว่าง H/C และ O/C

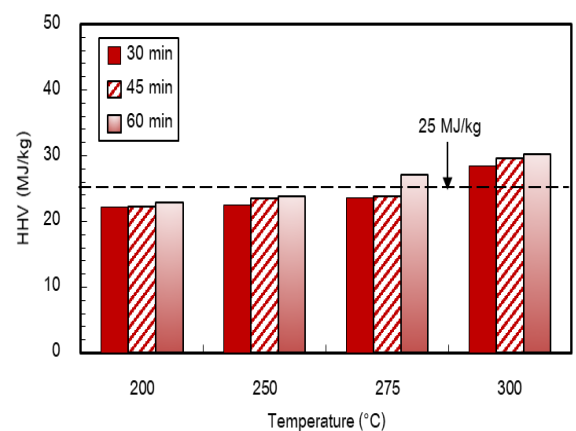
รูปที่ 2 แสดงอัตราส่วนอะตอมของ H/C และ O/C ของกากกาแฟที่ผ่านการทอริแฟกชั่นที่ระยะเวลา 30 นาที รูปดังกล่าวถูกเรียกว่า van Krevelen diagram [7] จากรูปอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C อยู่ระหว่าง 1 - 1.5 และ 0.2 - 0.4 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชั่นเพิ่มขึ้น อัตราส่วนระหว่าง H/C และ O/C มีค่าลดลง โดยมีลักษณะการกระจายตัวเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือที่ 0.98 ความชันของเส้นมีค่าเท่ากับ 1.826 แสดงให้เห็นว่าค่า H/C มีค่าประมาณ 2 เท่าของ O/C แสดงถึงการกำจัดปริมาณความชื้นที่อยู่ในชีวมวลซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของการทอริแฟกชั่นรูปดังกล่าวสามารถช่วยทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง H/C และ O/C ของการทอริแฟกชั่นในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ขอบเขตของการทดลองนี้ได้

3.2 สมรรถนะการทอริแฟกชั่น

ประสิทธิภาพในการทอริแฟกชั่นมักแสดงในรูปของผลผลิตเชิงมวล (Mass yield, MY) ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield, EY) และ ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density, ED)



รูปที่ 3 อุณหภูมิและระยะเวลาต่อผลผลิตเชิงมวล



รูปที่ 4 อุณหภูมิและระยะเวลาต่อค่าความร้อนสูง

รูปที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิ (200 ถึง 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาในการทอริแฟกชั่น (30 ถึง 60 นาที) ต่อผลผลิตเชิงมวล ซึ่งผลผลิตเชิงมวลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

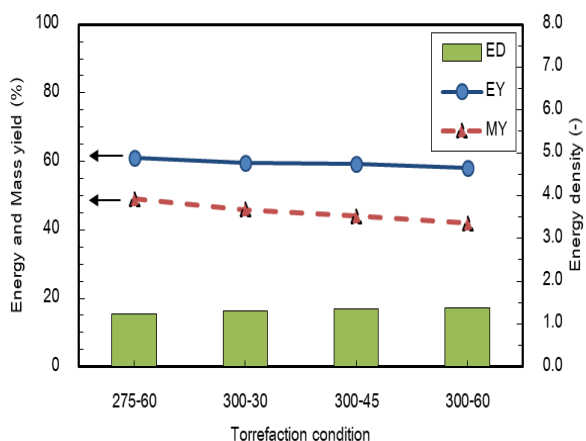
จากรูปที่ 3 เมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชั่นเพิ่มสูงขึ้นจาก 200 เป็น 300 องศาเซลเซียส ผลผลิตเชิงมวลมีค่าลดลงจาก ร้อยละ 80 เหลือเพียงประมาณร้อยละ 40 เนื่องจากเกิดการสลายของปริมาณความชื้นและสารระเหยง่ายบางส่วนในส่วนของเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณคาร์บอนในชีวมวลมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ H และ O มีค่าลดลง [7] เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการทอริแฟกชั่นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลผลิตเชิงมวลน้อย (ร้อยละ 1-2)

รูปที่ 4 แสดงผลของอุณหภูมิ (200 ถึง 300 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (30 ถึง 60 นาที) ต่อค่าความร้อนสูงของกากกาแฟหลังผ่านกระบวนการทอริแฟกชั่น เป็นที่แน่ชัดว่าระยะเวลาในการทอริแฟกชั่นไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า

ความร้อนสูงของกากกาแฟ ค่าความร้อนสูงมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ 22 MJ/kg ขณะที่อุณหภูมิทอริแฟกชัน 275 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ค่าความร้อนสูงเริ่มมีการเพิ่มขึ้นเป็น 26 MJ/kg จนถึง 29 MJ/kg ที่ 300 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงของกากกาแฟมีค่าใกล้เคียงค่าความร้อนของถ่านหินซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 MJ/kg [4] ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากากกาแฟหลังผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยความร้อนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งเพื่อใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านหิน ได้ อย่างไรก็ตาม พลังงานที่ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับสภาพดังกล่าว ควรถูกพิจารณาด้วยในงานวิจัยนี้การทอริแฟกชันตั้งแต่ 275 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที เป็นต้นไป จะถูกนำไปวิเคราะห์ทางด้านพลังงานในหัวข้อถัดไป

3.3 การวิเคราะห์พลังงาน

การทอริแฟกชันที่ 275 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา จาก 30 ถึง 60 นาที สามารถแสดงในรูปของอุณหภูมิ-ระยะเวลา ดังต่อไปนี้ : 275-60, 300-30, 300-45 และ 300-60 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของผลผลิตเชิงมวล (MY) ผลผลิตเชิงพลังงาน (EY) และความหนาแน่นเชิงพลังงาน (ED) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุณหภูมิและระยะเวลาของการทอริแฟกชันต่อค่า MY, EY และ ED

จากรูปที่ 5 พบว่า ความหนาแน่นเชิงพลังงานและผลผลิตเชิงพลังงาน มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 1.4 และร้อยละ 59 ถึง 61 ตามลำดับ ผลผลิตเชิงมวลมีค่าค่อยๆ ลดลง

จากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 40 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการทอริแฟกชัน การทอริแฟกชันมักมีความร้อนที่สะสมในก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการสร้างบรรยากาศที่ปราศจากอากาศ โดยทั่วไปมักใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ความร้อนดังกล่าวสามารถแสดงในรูปของเอนทาลปี (ΔH_T , kJ/kmol) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\Delta H_T = \int_{298}^T (c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3) d\theta \quad (4)$$

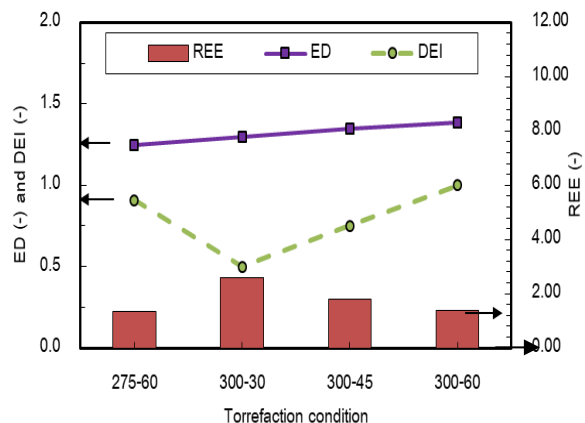
เมื่อ T คือ อุณหภูมิในการทอริแฟกชัน (K) c_0 , c_1 , c_2 และ c_3 คือ ค่าคงที่ สามารถหาได้จาก [10] เพื่อนำไปหาค่าเอนทาลปี ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 273 ถึง 1800 K และระยะเวลาในการทอริแฟกชัน (30, 45 และ 60 นาที) พลังงานสำหรับแก๊สไนโตรเจน (E_{in}) สามารถแสดงดังตารางที่ 3 พลังงานเข้าระบบทอริแฟกชันของไนโตรเจนสามารถแสดงในรูปของ DEI (Dimensionless Energy Input) ดังสมการที่ 5 โดยพลังงานจากการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ถูกเลือกเป็นพลังงานอ้างอิง ($E_{in,0}$)

$$DEI = \frac{E_{in}}{E_{in,0}} = \frac{\Delta H_T \cdot V \cdot t}{\Delta H_{573K} \cdot V \cdot 60} = \frac{\Delta H_T \cdot t}{\Delta H_{573K} \cdot 60} \quad (5)$$

เมื่อ V และ t คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สไนโตรเจน (ลิตร/นาที) และระยะเวลาในการทอริแฟกชัน (นาที) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่าเอนทาลปีที่เพิ่มขึ้นและพลังงานเข้าทอริแฟกชันของไนโตรเจนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ระยะเวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	200	250	275	300
ค่าเอนทาลปีที่เพิ่มขึ้น (kJ/kmol)				
	5135	6623.4	7371.8	8123.1
พลังงานเข้าทอริแฟกชัน (kJ)				
30	61.84	79.69	88.68	97.73
45	92.76	119.54	133.03	146.59
60	123.68	159.39	177.37	195.45



รูปที่ 6 อุณหภูมิและระยะเวลาของการทอริแฟกชันต่อค่า ED, DEI และ REE

นอกจากค่า DEI ซึ่งเป็นตัวแทนของพลังงานงานที่เข้าในระบบทอริแฟกชันแล้ว ตัวแปรที่เชิงประสิทธิภาพของระบบทอริแฟกชันอีกตัวแปรหนึ่ง ได้แก่ ประสิทธิภาพของพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Energy Efficiency, REE) ถูกกำหนดเพื่อใช้บ่งชี้ประสิทธิภาพของการทอริแฟกชัน โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ระบบทอริแฟกชันทำได้ (ED) เทียบกับพลังงานที่ป้อนเข้าระบบ (DEI) ค่า REE สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 ดังต่อไปนี้

$$REE = \frac{ED}{DEI} \quad (6)$$

รูปที่ 6 แสดงผลของการทอริแฟกชันต่อตัวแปรเชิงพลังงาน ได้แก่ ค่า ED, DEI และ REE จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่า ED มีค่าเพิ่มเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาของการทอริแฟกชันเพิ่มขึ้น เนื่องการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูง ดังแสดงในรูปที่ 4 การทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที มีค่า REE มากที่สุด (2.59) เนื่องจากค่า DEI มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น เป็นที่สังเกตว่าค่า REE จากการทอริแฟกชันที่ 275 องศาเซลเซียสและการทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที มีค่า REE ใกล้เคียงกัน จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ค่า REE ที่เหมาะสมสำหรับการทอริแฟกชันภายในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 ถึง 60 นาที คือ การทอริแฟกชันที่ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที หรือกล่าวได้ว่า

การทอริแฟกชันที่อุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้น ทำให้เกิดการใช้พลังงานที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [11]

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์พลังงานของกากกาแฟ ซึ่งได้จากการทดสอบโดยกระบวนการทอริแฟกชันที่อุณหภูมิเท่ากับ 200, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทอริแฟกชันทำให้อัตราส่วนโดยอะตอมของ H/C และ O/C มีค่าลดลง ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานมีค่าลดลง ความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบทอริแฟกชัน พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 30 นาที มีค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 28.2 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการใช้พลังงานที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Agbor E, Zhang X, Kumar A. A review of biomass co-firing in North America. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014; 40(12): 930-943.
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy (Internet). Thailand; 2019 [cited 2019 Mar 10]. Available from: <http://www.dede.go.th>.
- [3] กรุงเทพธุรกิจ. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 มีนาคม 2562]. เข้าถึงได้จาก <http://www.bangkokbiznews.com>

- [4] ดุษฎีพร สิทธิกุล. คุณสมบัติของชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชั่น. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2556.
- [5] Basu P. Biomass gasification, Pyrolysis and torrefaction. Practical design and theory. 3rd ed. Academic press: San Diego; 2018.
- [6] Granados D.A, Ruiz R.A, Vega LY, Chejne F. Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. Energy. 2017; 139: 818-827.
- [7] Zhang C, Ho SH, Chen WH, Xie Y, Liu Z, Chang JS. Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. Applied Energy. 2018; 220: 598-604.
- [8] Du SW, Chen WH, Lucas JA. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. Bioresource Technology. 2014; 161: 333-9.
- [9] Prins MJ, Ptasinski KJ, Janssen FJ. More efficient biomass gasification via torrefaction. Energy. 2006; 31(15): 3458-3470.
- [10] Çengel YA, Bole MA. Thermodynamics: An Engineering approach. 6th ed. McGraw-Hill: Boston; 2007
- [11] Chen WH, Huang MY, Chang JS, Chen CY, Lee WJ. An energy analysis of torrefaction for upgrading microalga residue as a solid fuel. Bioresource technology. 2015; 185(6): 285-293.