



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การทอริแฟคชันด้วยแก๊สไอเสียสำหรับชีวมวลเปลือกแข็ง

Flue gas torrefaction for solid shell biomass

สุภาภรณ์ กลิ่นเกษร คณิต มานะธนะ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Supapron Klinkeson Kanit Manatura*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140

* Corresponding author.

E-mail: kanitmana@gmail.com; Telephone: 034 355310

วันที่รับบทความ 26 มีนาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 30 พฤษภาคม 2564 ; ครั้งที่ 2 20 กรกฎาคม 2564 ; วันที่ตอบรับบทความ 14 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะการทอริแฟคชันของเปลือกแมคคาเดเมียภายใต้สภาวะแก๊สไอเสียแห้ง ผลของอุณหภูมิการทอริแฟคชันที่ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 30, 45 และ 60 นาที ต่อผลผลิตเชิงมวล, ความหนาแน่นเชิงพลังงาน ผลผลิตเชิงพลังงานและสมบัติความไม่ชอบน้ำได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการทอริแฟคชันส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลง ขณะที่คาร์บอนคงตัวและเถ้าสูงขึ้นภายใต้สภาวะแก๊สไอเสีย (ออกซิเจนร้อยละ 5 โดยปริมาตร) เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้อุณหภูมิและระยะเวลาการทอริแฟคชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตเชิงมวลลดลง ค่าความร้อนและผลผลิตเชิงพลังงานสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทอริแฟคชันภายใต้สภาวะแก๊สเฉื่อย (แก๊สไนโตรเจน) เปลือกแมคคาเดเมียที่ผ่านการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 21.7-30.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าเปลือกแมคคาเดเมียที่ผ่านการทอริแฟคชันโดยแก๊สไนโตรเจน (19.5-28.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานจากการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 39-74 และร้อยละ 63.5-90.4 ตามลำดับ ความไม่ชอบน้ำของเชื้อเพลิงถูกวัดจากมุมสัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงและหยดน้ำ ซึ่งการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีมุมที่น้อยกว่าแก๊สไนโตรเจนเนื่องจากเกิดการออกซิเดชันของน้ำมันดินบนพื้นผิวของตัวถ่าน การทอริแฟคชันที่เหมาะสมจากการศึกษานี้คือ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 45 นาที โดยมีค่าความร้อนสูงสุดที่ 30.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม การทอริแฟคชันโดยใช้แก๊สไอเสียในระดับอุตสาหกรรมเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดต้นทุนในการปรับปรุงสภาพเชื้อเพลิงได้

คำสำคัญ

ทอริแฟคชัน เปลือกแมคคาเดเมีย แก๊สไอเสีย ผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน

Abstract

The aim of this research is to study torrefaction performance of macadamia shell under dry flue gas conditions. Effect of torrefaction temperature at 200, 250 and 300 °C and duration time of 30, 45 and 60 minutes on the mass yield, energy density, energy yield and hydrophobicity were investigated in this work. According to the results, increasing the temperature and duration time of torrefaction led to decrease in moisture and volatile content, while the fixed carbon and ash were higher under the flue gas conditions (5% oxygen by volume) due to oxidation reaction. The increasing temperature and time also resulted in lower mass yield. Calorific value and energy yield of flue gas torrefaction were improved compared with torrefaction under inert gas conditions (nitrogen gas). Torrefied macadamia shell produced 21.7-

30.9 MJ/kg, which higher than of by nitrogen gas (19.5-28.6 MJ/kg). The mass yield and energy yield were in range of 39-74 % and 63.5-90.4 %, respectively. Contact angle of the torrefied fuel with the flue gas was lower than that of nitrogen gas due to the oxidation of tar on the surface of the charcoal in the oxidation reaction. Torrefaction using flue gas reduce fuel costs in thermal pretreatment process compared to the nitrogen. The optimum flue gas torrefaction conditions are 300 °C and 45 min, highest calorific value of 30.9 MJ/kg.

Keywords

torrefaction; macadamia shell; flue gas; mass yield; energy yield

1. คำนำ

ปัจจุบันพลังงานชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานอันดับสี่รองจากน้ำมัน, ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ [1] ซึ่งแตกต่างจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่มีจุดประสงค์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยการพัฒนางานพลังงานชีวภาพส่วนใหญ่เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่นำไปใช้กับความร้อนร่วมและการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเชื้อเพลิงชีวภาพถูกสร้างขึ้นจากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยในปี 2558 โครงการพัฒนาโดยยูเอเอ็นเอเนื่องมาจากพระราชดำริ มีกำลังการผลิต 60 ตันต่อปี [2] โดยแมคคาเดเมียเป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่งที่นิยมปลูกในพื้นที่ดังกล่าว ภายในเมล็ดแมคคาเดเมียจะประกอบด้วย เมล็ดซึ่งเป็นส่วนที่นำไปรับประทานได้ และเปลือกนอกซึ่งจะถูกนำไปทิ้งเป็นปุ๋ยหรือถ่านแมคคาเดเมีย โดยเปลือกแมคคาเดเมียถือว่าเป็นชีวมวลซึ่งมีข้อดีในการทำเป็นเชื้อเพลิงคือ ค่าความชื้นสูง ค่าความร้อนต่ำ ขอบน้ำ การบดอัดยาก หากนำเปลือกแมคคาเดเมียมาใช้โดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป อาจเกิดปัญหาเนื่องจากปริมาณความชื้นในตัวอย่างดิบมีค่าความชื้นที่สูงทำให้เกิดเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษา และเชื้อเพลิงมีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ได้ออกมาไม่สม่ำเสมอ ข้อเสียดังกล่าวสามารถปรับปรุงได้โดยกระบวนการอัด (densification) เชื้อเพลิงให้เป็นแท่งและการทอริแฟคชันซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการแปลงทางเคมีความร้อน ที่สามารถยกระดับชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพและปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงให้มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน

กระบวนการทอริแฟคชัน คือ การแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะอยู่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่อนาที่ เวลาประมาณ 30-120 นาที่ การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชันส่งผลให้

ผลผลิตเชิงมวล ความหนาแน่น และความสามารถในการรับแรงกดอัดมีค่าลดลง แต่ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากภายหลังจากการทอริแฟคชัน เชื้อเพลิงอัดเม็ดจะมีปริมาณคาร์บอนซึ่งเป็นแหล่งให้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ 3 กลุ่ม คือ ของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส

งานวิจัยเกี่ยวกับการทอริแฟคชันโดยใช้ไนโตรเจนมีจำนวนมาก เช่น งานวิจัย Mahantadsanapong และ Ngernyen [3] ได้ทำการศึกษาการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชันเพิ่มสูงขึ้น ผลผลิตเชิงมวล ความหนาแน่น และความสามารถในการรับแรงกดอัดมีค่าลดลง แต่ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากภายหลังจากการทอริแฟคชัน เชื้อเพลิงอัดเม็ดจะมีปริมาณคาร์บอนซึ่งเป็นแหล่งให้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริแฟคชันจากกากหม้อกรองมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 16-30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม Bridgeman และคณะ [4] ศึกษาประสิทธิภาพการทอริแฟคชันของไม้เบิร์ช (Birch) ไม้สน และชานอ้อย ซึ่งการใช้แก๊สไนโตรเจนในกระบวนการทอริแฟคชันยังมีข้อเสียคือต้นทุนของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีราคาสูง ถ้าประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม การใช้แก๊สไนโตรเจนในปริมาณมากนั้นจะทำให้มีต้นทุนในการผลิตมากด้วยเหตุผลนี้จึงมีหลายงานวิจัยที่พยายามค้นหาสิ่งที่มาทดแทน

การทอริแฟคชันโดยใช้แก๊สไอเสียสามารถแก้ไขข้อเสียของการทอริแฟคชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจนได้เนื่องจากแก๊สไอเสียเป็นแก๊สที่ถูกปล่อยมาจากการเผาไหม้ซึ่งจะลดต้นทุนของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือ งานวิจัยของ Uemura และคณะ [5] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและออกซิเจน (ร้อยละ 0, 3, 9 และ 15) ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า การใช้แก๊สไอเสียช่วยย่นระยะเวลาการทอริแฟคชัน แม้ว่าผลผลิตเชิงพลังงานและ

ผลผลิตเชิงมวลลดลงตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Onsrree และคณะ [6] ได้ทำการทอรีแฟคชันนำ ซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ โดยจำลอง แก๊สไอเสียแบบเปียก (H_2O ร้อยละ 0-21, CO_2 ร้อยละ 12, O_2 ร้อยละ 4 สมดุลโดย N_2) ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ที่เวลา 10-40 นาที พบว่าเวลา 30-40 นาที ค่าความร้อนของ แก๊สไอเสียแห้ง (Dry flue gas) ที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 0 มีค่า ความร้อนมากที่สุด 24 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและไอน้ำมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เชื้อเพลิงทำให้เกิดการสลายเส้นใยในชีวมวล

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าโดยทั่วไปยังมีการศึกษา การทอรีแฟคชันของชีวมวลเปลือกแข็ง (เปลือกแมคคาเดเมีย) ภายใต้สภาวะแก๊สไอเสียอยู่จำนวนน้อยมาก ซึ่งงานวิจัยนี้ นำเสนอผลของการทอรีแฟคชันเปลือกแมคคาเดเมียใน บรรยากาศแก๊สไอเสียแห้ง (ออกซิเจน ร้อยละ 5 โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิทอรีแฟคชัน (200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส) เวลา 30, 45 และ 60 นาที ต่อสมรรถนะการทอรีแฟคชัน (ผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน เป็นต้น) โดย เปรียบเทียบ ผลที่ได้กับการทอรีแฟคชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจน นอกจากนี้ยัง ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิง ดิบและเชื้อเพลิงที่ผ่านการปรับสภาพทางความร้อนดังกล่าวอีกด้วย

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

เปลือกแมคคาเดเมียที่เหลือทิ้งจากวิสาหกิจชุมชนจังหวัด เชียงราย ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ ซึ่งเชื้อเพลิง เปลือกแมคคาเดเมียทำโดยนำเปลือกแมคคาเดเมียบดเป็นผง และร่อนด้วยตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร มาบ่อนใส่เครื่อง อัดเม็ด โดยผ่านตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร จากนั้นทำการอัดโดยใช้น้ำเป็นตัวประสาน ดังแสดง ในรูปที่ 1 โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของ เชื้อเพลิงเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิง ชีวมวลอัดเม็ด ที่กำหนดไว้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางชีวมวลอัดเม็ด ทั้งเกรตธรรมดาและเกรตคุณภาพสูง มีค่าไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร หรือ 0.6 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 12 มิลลิเมตร หรือ 1.2 เซนติเมตร ส่วนความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง ร่าง

มาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร หรือ 0.315 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 40 มิลลิเมตร หรือ 4 เซนติเมตร ทั้งเกรตธรรมดาและเกรตคุณภาพสูง แล้วจึงนำมาทำ ให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่น้ำหนักของเชื้อเพลิงมี ค่าคงที่

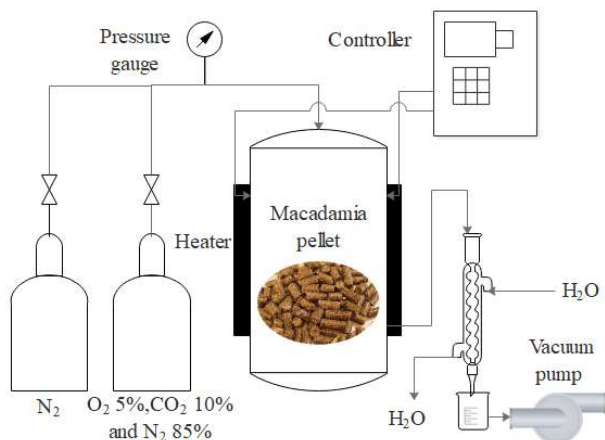


รูปที่ 1 (ก) เปลือกแมคคาเดเมียดิบ (ข) เปลือกแมคคาเดเมียผง และ (ค) เปลือกแมคคาเดเมียอัดเม็ด

2.2 การทอรีแฟคชัน

เริ่มต้นจากการนำเปลือกแมคคาเดเมียอัดเม็ดปริมาณ ประมาณ 100 กรัม เข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed – bed reactor) ซึ่งทำจากเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร ภายในเตาถูกปรับให้อยู่ใน สภาวะสูญญากาศโดยใช้ปั๊มสูญญากาศดึงอากาศจาก ภายในเตาออก เพื่อให้สภาวะในเตาปราศจากอากาศ จากนั้นทำการปล่อยหรือแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 2 ลิตร ต่อนาที เข้าไปภายในเตาเผาลดการทดลองแต่ละครั้ง โดย แก๊สไอเสียซึ่งเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่ถูกจำลองขึ้นมาจากการผสม แก๊สต่างๆเข้าด้วยกันจากโรงงานผลิตแก๊สแห่งหนึ่งในจังหวัด นครปฐม หลังจากนั้นเปิดการทำงานของตู้ควบคุมอุณหภูมิ โดยจ่ายไฟไปที่ฮีตเตอร์ซึ่งมีขนาด 2 กิโลวัตต์ ที่อัตราการให้ ความร้อน 17 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิทอรี แฟคชัน (200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส) โดยเวลาที่ใช้ใน การทอรีแฟคชัน 30, 45 และ 60 นาที หลังจากเสร็จการทอรี แฟคชันทำการปิดอุปกรณ์ตู้ควบคุมอุณหภูมิและวาล์วแก๊ส ปล่อยแก๊สทอรีแฟคชันผ่านชุดกลั่นควบแน่น ก่อนปล่อย ออกมาสู่ภายนอก พร้อมปล่อยให้เตาเผาเย็นตัวลง การทดลอง แต่ละครั้งมีการทำซ้ำ 2 ครั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ ไตอะแกรมแสดงการทำงานของระบบทอรีแฟคชันดังรูปที่ 2

การเลือกเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพการทอรีแฟคชั่น จากการวิเคราะห์โดยผลผลิตเชิงมวล, ความหนาแน่นเชิงพลังงาน และผลผลิตเชิงพลังงาน [7]



รูปที่ 2 ไดอะแกรมการทอรีแฟคชั่น

ผลผลิตเชิงมวล (Mass yield)

แสดงถึงปริมาณของผลผลิตที่ได้หลังกระบวนการทอรีแฟคชั่น ในเตาปฏิกรณ์ทอรีแฟคชั่น แล้วควบคุมสถานะของปัจจัยที่ศึกษาตามที่กำหนดจากนั้นจึงชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้และคำนวณร้อยละผลได้เชิงมวลดังสมการที่ (1)

$$\text{Mass yield (\%)} = \frac{m_t}{m_o} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ m_t คือ มวลของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังทำทอรีแฟคชั่น (กรัม) และ m_o คือ มวลของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอรีแฟคชั่น (กรัม)

ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density)

ปริมาณพลังงานที่สามารถเก็บไว้ในมวลของสารหรือระบบ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนที่ได้หลังจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น ตามสมการที่ (2)

$$\text{Energy density (-)} = \frac{HHV_t}{HHV_o} \quad (2)$$

HHV_t คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังทำทอรีแฟคชั่น (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) และ HHV_o คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอรีแฟคชั่น (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield)

ผลผลิตเชิงพลังงานเป็นตัวบ่งชี้ว่าพลังงานจะถูกเก็บไว้ในชีวมวลหลังจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณพลังงานและผลผลิตเชิงมวล [8] ดังสมการที่ (3)

$$\text{Energy yield (\%)} = \text{Energy density} \times \text{Mass yield} \quad (3)$$

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของเปลือกแมคคาเดเมีย

การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลดิบและชีวมวลที่ผ่านการทอรีแฟคชั่น จำแนกได้ดังกระบวนการต่อไปนี้

(1) ค่าความร้อน ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter, ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-500) ตามมาตรฐาน ASTM D5865

(2) การวิเคราะห์เชิงประมาณ (Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย เถ้า และความชื้น โดยการ วิเคราะห์ปริมาณความชื้นใช้มาตรฐาน EN 15414- 3: 2011 (European Committee for Standardization ,2011) การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยและปริมาณเถ้าใช้ตัวอย่างที่ทำปริมาณความชื้นแล้ว ตามมาตรฐาน EN 15402:2011, EN 15403:2011 ตามลำดับ จะได้ค่าในฐานมวลแห้ง (Dry basis) ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวคำนวณได้จาก 100 - ร้อยละปริมาณเถ้า - ร้อยละปริมาณสารระเหย แสดงดังตารางที่ 1

(3) การวิเคราะห์องค์ประกอบ (Elemental analysis) เป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุในตัวอย่าง ได้แก่ ร้อยละคาร์บอน (C), ร้อยละไฮโดรเจน (H), ร้อยละออกซิเจน (O) และร้อยละไนโตรเจน (N) ซึ่งถูกนำเสนอโดย Nhuchhen [9] มีขอบเขตในการใช้สมการ VM, FC, ASH เท่ากับร้อยละโดยน้ำหนัก 13.30-93.60, 0.67-82.74 และ 0.01-48.70 ตามลำดับ ดังสมการ (และ (5) ,(4ตามลำดับ (6)

$$C = 1.0396FC + 0.0757VM^{1.3773} \quad (4)$$

$$H = 55.3678 - 0.4830VM - 0.5319FC - 0.5600ASH \quad (5)$$

$$O = -0.0198FC + 0.7244VM^{0.9239} \quad (6)$$

(4) มุมสัมผัส (Contact angle)

เป็นการศึกษาสมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของพื้นผิวเชื้อเพลิง โดยการหยดสารละลาย คือ น้ำ ลงบนพื้นผิว และทำการวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้น โดยเครื่องวัดมุมสัมผัสที่ผิว

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) และแบบประมาณ (Proximate analysis) ของเปลือกแมคคาเดเมียก่อนทอริแฟคชัน

เชิงประมาณ	พื้นฐานที่รับมา (%)
ความชื้น	5.6
สารระเหย	04.81
คาร์บอนคงตัว	24.12
เถ้า	21.0
องค์ประกอบ	พื้นฐานแห้งและไร้เถ้า (%)
C	93.44
H	59.9
O	41.78
N (โดยผลต่าง)	3.69
HHV (MJ/kg)	17.82

3. ผลการวิจัย

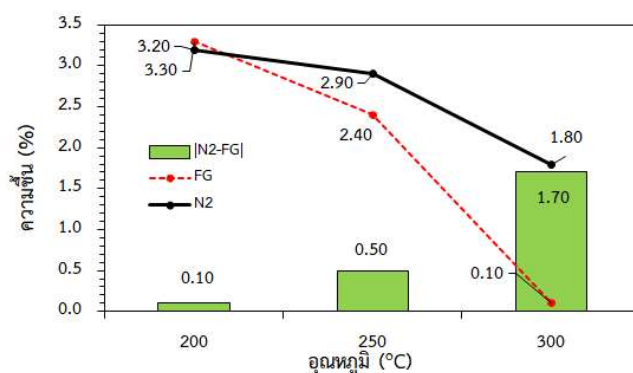
3.1 การวิเคราะห์เชิงประมาณ (Proximate analysis)

ผลจากการวิเคราะห์เชิงประมาณของเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า เปลือกแมคคาเดเมียดิบมีค่า C, H, O และ N เท่ากับ ร้อยละ 44.93, 9.59, 41.78 และ 3.69 ตามลำดับ พบว่าค่า C มีปริมาณร้อยละ 44.93 ซึ่งมีปริมาณที่มากแต่ค่า O มีปริมาณร้อยละ 41.78 ส่งผลให้ค่าเปลือกแมคคาเดเมียดิบมีความร้อน 17.82 MJ/kg

ตารางที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชันต่อการวิเคราะห์เชิงประมาณของเปลือกแมคคาเดเมีย พบว่า ช่วงอุณหภูมิมีผลต่อการลดลงของความชื้นและสารระเหยมากกว่าระยะเวลาในการทอริแฟคชัน เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงการทอริแฟคชันสามารถกำจัดน้ำและเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในโครงสร้างของเปลือกแมคคาเดเมีย โดยเป็นการทำลายหมู่ -OH ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ส่งผลให้การดูดความชื้นต่ำลง [6] เมื่อ

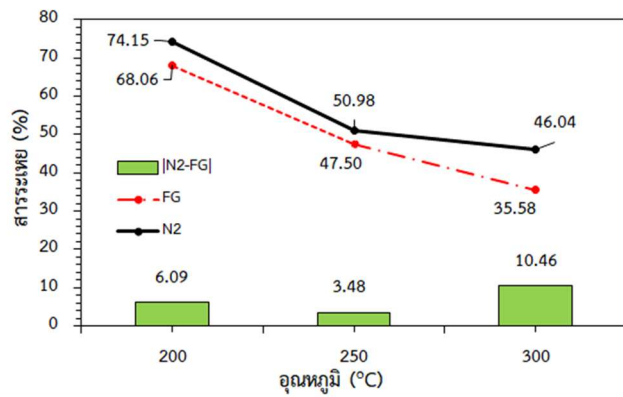
เปรียบเทียบแก๊สไอเสียและแก๊สไนโตรเจน พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความชื้นและสารระเหยของเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีแนวโน้มลดลงมากกว่าแก๊สไนโตรเจนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวที่ทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าอยู่ระหว่าง 27.0 ± 1.0 ถึง 63.0 ± 1.6 ซึ่งมากกว่าทอริแฟคชันโดยแก๊สไนโตรเจนมีค่าอยู่ระหว่าง $1 \pm 0.20.1$ ถึง 55.8 ± 1.3

รูปที่ 3 แสดงอุณหภูมิการทอริแฟคชันต่อความชื้นที่เวลา 45 นาที จะพบว่า ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยไนโตรเจนและแก๊สไอเสีย มีค่าอยู่ระหว่าง 1.8 ± 0.1 ถึง 3.2 ± 0.2 และ $1 \pm 0.0.1$ ถึง $3 \pm 0.3.1$ ตามลำดับ โดยค่าผลต่างระหว่างไนโตรเจนกับแก๊สไอเสียมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จาก 0.10 เป็น 1.70 ตามอุณหภูมิการทอริแฟคชันที่เพิ่มสูงขึ้นโดยการลดลงอย่างมากของความชื้นที่ใช้แก๊สไอเสียเนื่องจากเกิดจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของชีวมวล (Oxidation)



รูปที่ 3 อุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อความชื้นที่ระยะเวลา 45 นาที

นอกจากนั้นเม็ดเชื้อเพลิงทอริแฟคชันยังมีสารระเหยลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้สารระเหยสามารถสลายตัวออกจากโครงสร้างมากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแก๊สไนโตรเจนและแก๊สไอเสียพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีสารระเหยที่น้อยกว่าแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mei และคณะ [10] ซึ่งระบุว่าการใช้แก๊สไอเสียในการทอริแฟคชันทำให้ปริมาณสารระเหยลดลงมากกว่าการใช้แก๊สไนโตรเจน และยังมีพฤติกรรมเผาไหม้คล้ายคลึงกับถ่าน

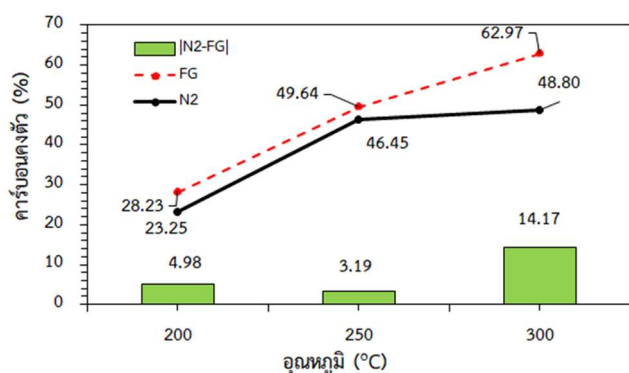


รูปที่ 4 อุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อสารระเหยที่ระยะเวลา 45 นาที

สำหรับปริมาณคาร์บอนคั่งตัวในเชื้อเพลิงทอริแฟคชันพบว่าค่าเพิ่มสูงขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการทอริแฟคชันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Chen และคณะ [8] เนื่องจากกระบวนการทอริแฟคชันทำให้สารระเหยออกจากโครงสร้างเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นคาร์บอน ซึ่งเป็นแหล่งให้พลังงาน ดังนั้นเมื่อเชื้อเพลิงทอริแฟคชันมีปริมาณคาร์บอนคั่งตัวสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการทอริแฟคชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สไอเสียที่อุณหภูมิเดียวกันจะพบว่าปริมาณคาร์บอนคั่งตัวของเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียจะมีความมากกว่า เนื่องจากปริมาณสารระเหยที่ลดลงจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของชีวมวลแสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเปลือกแมคคาเดเมีย

	N ₂	FG	N ₂	FG	N ₂	FG
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						
	200 °C		250 °C		300 °C	
นาที่	ความชื้น (wt%)					
30	3.5 ± 0.1	3.5 ± 0.2	8 ± 0.2.1	7 ± 0.2.2	2 ± 0.2.4	6 ± 0.1.1
45	3.2 ± 0.2	3 ± 0.3.1	2.9 ± 0.1	4 ± 0.2.8	1.8 ± 0.1	1 ± 0.0.1
60	7 ± 0.2.1	7 ± 0.2.2	8 ± 0.1.1	4 ± 0.2.4	8 ± 0.0.4	.01 ± 0.1
นาที่	สารระเหย (wt%)					
30	2 ± 1.74.5	2 ± 1.69.0	0 ± 0.71.0	2 ± 0.46.3	9 ± 0.50.2	5 ± 0.45.2
45	1 ± 0.74.4	0 ± 0.68.4	0 ± 0.51.6	5 ± 0.47.1	0 ± 0.46.6	5 ± 0.35.1
60	0 ± 0.75.3	1 ± 0.69.1	5 ± 0.48.3	4 ± 0.46.2	8 ± 0.39.6	3 ± 0.43.1
นาที่	คาร์บอนคงตัว (wt%)					
30	1 ± 0.20.1	0 ± .271.0	2 ± 0.23.6	8 ± 0.50.4	3 ± .421.0	7 ± 0.51.3
45	2 ± 0.21.6	2 ± 0.28.5	4 ± 0.46.6	6 ± .492.4	8 ± 0.48.8	0 ± .631.6
60	5 ± .231.5	4 ± 0.27.3	3 ± 0.49.1	3 ± .501.0	8 ± .551.3	8 ± 0.58.2
นาที่	เถ้า (wt%)					
30	2 ± 0.0.3	0.2 ± 0.1	2 ± 0.0.3	0.3 ± 0.4	3 ± 0.0.4	1.1 ± 0.7
45	.04 ± 0.3	0.4 ± 0.2	.05 ± 0.1	0.4 ± 0.1	6 ± 0.0.4	1.3 ± 0.7
60	4 ± 0.0.3	0.8 ± 0.6	.06 ± 0.2	0.8 ± 0.2	7 ± 0.0.1	1.0 ± 0.3



รูปที่ 5 อุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อคาร์บอนคงตัวที่ระยะเวลา 45 นาที

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์แยกธาตุของเปลือกแมคคาเดเมีย

	N ₂	FG	N ₂	FG	N ₂	FG
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						
	200		250		300	
นาที	คาร์บอน (C)					
30	.514 ± 0.2	.564 ± 0.1	7 ± 0.52.1	.697 ± 0.6	3 ± 0.63.3	5 ± 0.69.8
45	1 ± .531.0	.569 ± 0.1	7 ± 0.66.5	.689 ± 0.1	.688 ± 0.1	9 ± 0.75.1
60	1 ± 0.54.9	1 ± 0.56.2	4 ± 0.68.3	.691 ± 0.5	8 ± 0.73.2	.716 ± 0.3
นาที	ไฮโดรเจน (H)					
30	8 ± 0.5.7	.57 ± 0.1	.57 ± 0.5	.45 ± 0.9	5 ± 0.4.2	4 ± 0.4.1
45	.59 ± 0.3	6 ± 0.5.5	7 ± 0.4.1	5 ± 0.4.9	5 ± 0.4.6	.39 ± 0.7
60	9 ± 0.5.1	6 ± 0.5.2	.46 ± 0.9	.45 ± 0.6	1 ± 0.4.1	.43 ± 0.4
นาที	ออกซิเจน (O)					
30	.395 ± 0.3	0 ± 0.37.3	7 ± 0.37.5	6 ± 0.24.1	2 ± 0.26.8	24.0 ± 1.0
45	.390 ± 0.2	3 ± 0.36.1	9 ± 0.26.8	2 ± 0.25.3	25.0 ± 0.1	4 ± 0.18.1
60	7 ± 0.39.9	6 ± 0.36.1	5 ± 0.25.1	6 ± 0.24.8	.208 ± 0.4	4 ± 0.22.9
นาที	ไนโตรเจน (N)					
30	3 ± 0.1.4	9 ± 0.0.7	.19 ± 0.4	.12 ± 0.1	9 ± 0.1.3	0 ± .21.2
45	1.0 ± 2.3	.12 ± 1.6	.16 ± 0.1	.14 ± 0.1	7 ± 0.1.9	7 ± .11.2
60	2 ± .10.4	.16 ± 0.1	4 ± .11.2	8 ± 0.1.8	2 ± 0.1.9	.17 ± 0.7

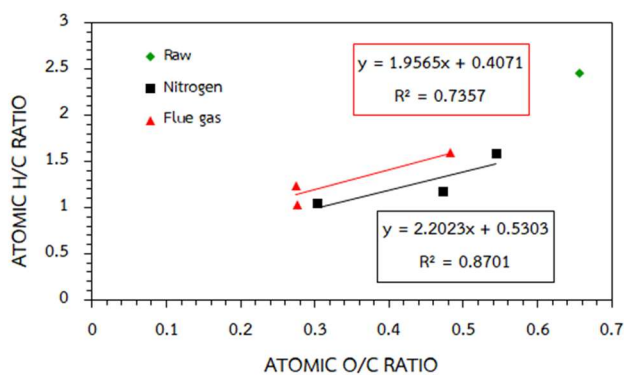
อุณหภูมิการทอริแฟคชันที่เพิ่มสูงขึ้นระหว่าง 170 – 225 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจน ไฮโดรเจนมีแนวโน้มที่ลดลงแต่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงก่อนทอริแฟคชัน [10] เนื่องมาจากเกิดการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เป็น ไอน้ำ, CO, และ CO₂ [11] ซึ่งอัตราส่วน

3.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Elemental analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (C, H และ O) ของเชื้อเพลิงชีวมวล แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งถูกนำเสนอในแผนภาพ Van krevelen แสดงดังรูปที่ 6 อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C สำหรับชีวมวลดิบเท่ากับ 2.5 และ 0.68 ทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียและไนโตรเจน อยู่ระหว่าง 1.03-1.58 และ 0.27-0.54 ตามลำดับ โดยจากกราฟมีลักษณะการกระจายตัวเป็นเชิงเส้นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือที่ใช้ไนโตรเจนและใช้แก๊สไอเสียที่ 0.87 และ 0.73 ตามลำดับ และความชันของเส้นมีค่าเท่ากับ 2.20 และ 1.96 ตามลำดับ แสดงว่าค่า H/C มีค่าประมาณ 2 เท่าของ O/C ทั้งใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สไอเสีย แสดงถึงการทอริแฟคชันส่งผลต่อค่าความชื้นให้ลดลง

ของ H/C และ O/C เป็นดัชนีที่ส่งผลต่อความหนาแน่นเชิงพลังงานของเชื้อเพลิง อัตราส่วนอะตอมของ H/C เทียบกับ O/C โดยการลดลงของออกซิเจนในเชื้อเพลิง จะเป็นปฏิกิริยาหลักไม่ว่าจะใช้แก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สไอเสียซึ่งถือเป็นข้อดีเพราะจะทำให้คว้นและไอน้ำที่ก่อตัวน้อยลงและระหว่าง

กระบวนการเผาไหม้กับแก๊สซิฟิเคชันเกิดการสูญเสียความร้อนลดลง [11] นอกจากนั้นยังทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสลดความเป็นกรดลง สำหรับแผนภาพ Van Krevelen นอกจากจะแสดงการเพิ่มของสัดส่วนอะตอม C แล้วยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของกระบวนการทอริแฟคชันต่ออัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์มากขึ้น [11] ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสัดส่วนอะตอมของ O, H, N และ S ระหว่างเชื้อเพลิงทอริแฟคชันกับถ่านหินจะพบว่าสัดส่วนของ N และ S มีค่าต่ำกว่า ดังนั้น NO_x และ SO_x ในไอเสียจะต่ำกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน แต่เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนของ O และ H ในชีวมวลยังสูงกว่าถ่านหินซึ่งจะส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริแฟคชันมีค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านหินในส่วนของอัตราส่วนของ O/C ของเชื้อเพลิงทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียจะลดลงมากกว่า เป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reactions) ของชีวมวลจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัว (Decomposition reaction) ทำให้มีการระเหยความชื้นและปริมาณสารระเหย (ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน) ออกจากชีวมวล รวมถึงมีการระเหยของก๊าซต่างๆ (H_2O , CO , CO_2 และสารอินทรีย์ระเหยง่ายอื่นๆ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mei และคณะ [10]

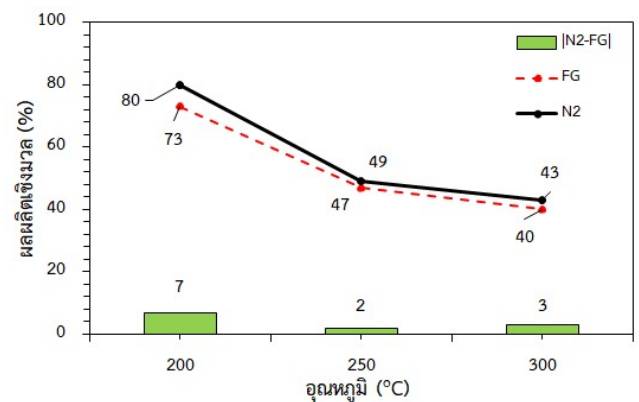


รูปที่ 6 ไดอะแกรมของ Van Krevelen และเส้นถดถอยระหว่าง H/C และ O/C

3.3 ผลผลิตเชิงมวล (Mass yield)

ผลผลิตเชิงมวลของเปลือกแมคคาเดเมียเมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟคชันพบว่า เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 200

องศาเซลเซียส เวลา 30 และ 45 นาที จะพบว่าค่าผลผลิตเชิงมวลของทอริแฟคชันโดยไนโตรเจนกับทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจาก อุณหภูมิในการใช้ไนโตรเจน เหมเซลลูโลสถูกย่อยสลายน้อยมาก จึงทำให้ผลผลิตเชิงมวลของไนโตรเจนมีค่ามากกว่า แสดงดังตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 250 กับ 300 องศาเซลเซียส จะพบว่าช่วงเวลานี้การทอริแฟคชันโดยไนโตรเจนมีผลผลิตเชิงมวลที่ลดลง 4 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 250 กับ 300 องศาเซลเซียส จะพบว่าช่วงเวลานี้การทอริแฟคชันโดยไนโตรเจนมีผลผลิตเชิงมวลที่ลดลงอย่างมาก แสดงว่าช่วงอุณหภูมินี้เกิดการสลายตัวของเอมิเซลลูโลสอย่างมาก อุณหภูมิมีผลทำให้สารระเหยสามารถสลายตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตเชิงมวลลดลง พิจารณาดังรูปที่ 7 เป็นผลผลิตเชิงมวลที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆที่เวลา 45 นาที จะพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีผลผลิตเชิงมวลมีค่าน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการทอริแฟคชัน โดยที่อุณหภูมิสูงผลต่าง ระหว่างแก๊สไนโตรเจนและแก๊สไอเสียจะมีค่าผลต่างที่น้อยลง เนื่องจาก เอมิเซลลูโลสที่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส [12] ใกล้หมดจึงทำให้น้ำหนักของเชื้อเพลิงเริ่มคงที่



รูปที่ 7 อุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อผลผลิตเชิงมวลที่ระยะเวลา 45 นาที

3.4 ค่าความร้อน (Heating value)

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลดิบโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter พบว่าเปลือกแมคคาเดเมียดิบ มีค่าความร้อน 17.82 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4 แสดงผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการทอริแฟคชันต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทอริ

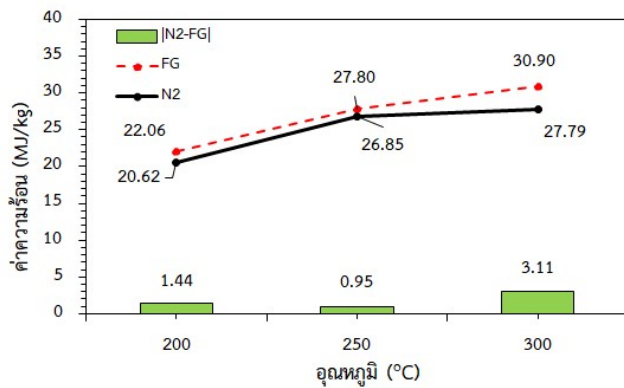
แฟคชันเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยไนโตรเจนและแก๊สไอเสีย มีค่าอยู่ระหว่าง 19.5 ± 1.1 ถึง 28.6 ± 1.0 และ 21.7 ± 0.4 ถึง 30.9 ± 0.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลผลิตเชิงมวล, ค่าความร้อนสูง (HHV) และผลผลิตเชิงพลังงาน ของเปลือกแมคคาเดเมียทอริแฟคชัน

	N ₂	FG	N ₂	FG	N ₂	FG
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)						
	200		250		300	
นาที่	ผลผลิตเชิงมวล (%)					
30	88 ± 0.7	74 ± 0.1	79 ± 0.8	52 ± 0.4	64 ± 0.5	44 ± 1.4
45	80 ± 1.4	73 ± 0.1	49 ± 2.1	47 ± 0.1	43 ± 0.7	40 ± 0.1
60	82 ± 1.1	67 ± 0.7	50 ± 0.7	43 ± 0.1	40 ± 0.8	39 ± 0.3
นาที่	ค่าความร้อน (MJ/kg)					
30	19.5 ± 1.1	21.8 ± 0.1	20.2 ± 0.1	28.2 ± 1.4	25.2 ± 0.7	28.1 ± 1.1
45	20.6 ± 0.8	22.0 ± 1.1	26.8 ± 0.1	27.8 ± 1.1	27.8 ± 0.1	30.9 ± 0.8
60	20.1 ± 0.7	21.7 ± 0.4	27.6 ± 0.1	27.9 ± 0.1	28.6 ± 1.0	29.0 ± 0.2
นาที่	ผลผลิตเชิงพลังงาน (%)					
30	93.2	90.4	89.7	77.5	90.4	67.9
45	92.6	90.4	73.8	73.3	67.0	69.4
60	92.8	81.7	77.5	67.4	64.1	63.5

รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อค่าความร้อนที่ระยะเวลา 45 นาที่ พบว่า ค่าความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระบวนการทอริแฟคชันเป็นกระบวนการทางความร้อน ซึ่งความร้อนจะถูกให้กับชีวมวลเพื่อสลายพันธะทางเคมี (พันธะโควาเลนต์) ของโครงสร้างของชีวมวลได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียสารระเหยที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบา ได้แก่ โมโนแซคคาไรด์ พอลิแซคคาไรด์ ไส้โตรซูก้า สารประกอบจำพวกกรดและน้ำ ส่งผลให้สัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน และสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีการลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้น [13] เชื้อเพลิงทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 21.7 ± 0.4 ถึง 30.9 ± 0.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าความร้อนมากกว่าเชื้อเพลิงทอริแฟคชันโดยไนโตรเจนมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 19.5 ± 1.1 ถึง 28.6 ± 1.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา

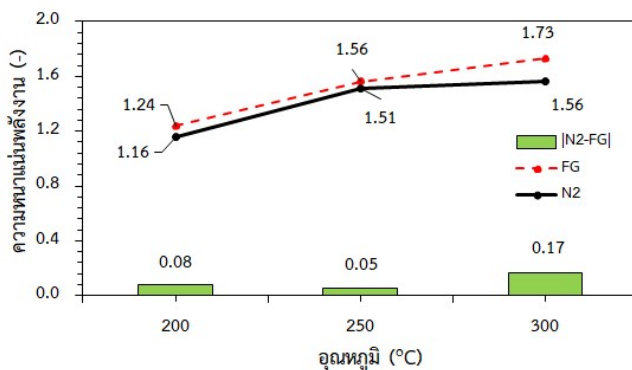
ออกซิเดชัน (Oxidation reactions) ของชีวมวลจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัว (Decomposition reaction) ทำให้มีการระเหยความชื้นและปริมาณสารระเหย (ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน) ลดลงมากกว่าทอริแฟคชันโดยไนโตรเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mei และคณะ [10] โดยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด กำหนดไว้ว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเกรดธรรมดามีค่าไม่น้อยกว่า 14.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ส่วนเกรดคุณภาพสูงมีค่าไม่น้อยกว่า 16.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [8] ดังนั้น เปลือกแมคคาเดเมียอัดเม็ดจึงมีค่าความร้อนเป็นไปตามมาตรฐาน



รูปที่ 8 อุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อค่าความร้อนที่ระยะเวลา 45 นาที

3.5 ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy density)

ความหนาแน่นเชิงพลังงานตามเงื่อนไขการทอริแฟคชันต่างๆแสดงดังรูปที่ 9 ค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยไนโตรเจนและแก๊สไอเสียจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.16-1.56 และ 1.24-1.73 ตามลำดับ โดยค่าความหนาแน่นเชิงพลังงานที่มากจะบ่งบอกถึงปริมาณของค่าความร้อนเชื้อเพลิงทอริแฟคชันที่มาก โดยอุณหภูมิทอริแฟคชันเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความรุนแรงของการทอริแฟคชัน กล่าวคือ ความหนาแน่นเชิงพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้น เชื้อเพลิงทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียจะมีค่าความร้อนมากกว่า เป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reactions) ทำให้ความหนาแน่นเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าสูงกว่าทอริแฟคชันโดยไนโตรเจน

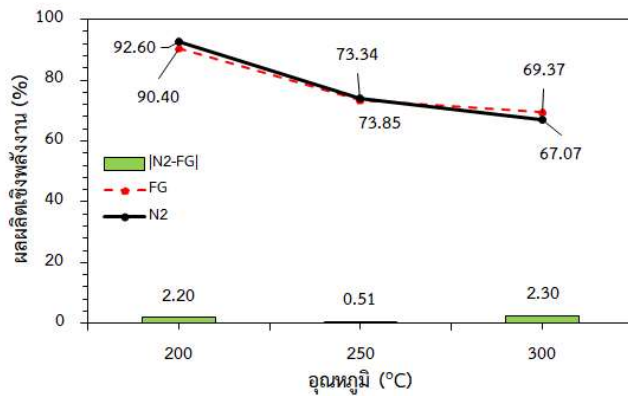


รูปที่ 9 อุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อความหนาแน่นพลังงานที่ระยะเวลา 45 นาที

3.6 ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy yield)

ในการวิเคราะห์ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานที่ได้จะสังเกตได้ว่าผลผลิตเชิงพลังงานที่ได้จะสูงกว่าผลผลิตเชิงมวลที่ได้เสมอที่สภาวะการทดลองเดียวกัน แสดงให้เห็นแม้ว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งจะมีปริมาณที่น้อยลง แต่พลังงานที่ได้ยังมีค่ามากกว่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียไป [3] ซึ่งจากการทดลองการทอริแฟคชันชีวมวลเมื่อใช้อุณหภูมิทอริแฟคชันที่เพิ่มขึ้นจะให้ผลต่างระหว่างผลผลิตเชิงมวลต่อผลผลิตเชิงพลังงานเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีแนวโน้มความหนาแน่นพลังงานที่สูงขึ้น เป็นเพราะว่าในระหว่างการทอริแฟคชัน พันธะ H-C และ O-C ที่เป็นองค์ประกอบภายในชีวมวลซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำจะถูกทำลายลงและถูกแปลงเป็นก๊าซจากการทอริแฟคชัน ในขณะเดียวกันชีวมวลที่เหลืออยู่ในรูปของของแข็งก็มีการก่อตัวเพิ่มขึ้นของพันธะ C-C ซึ่งเป็นพันธะที่มีพลังงานสูง [14] เมื่อพิจารณาผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยแก๊สไนโตรเจนสูงกว่าเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย แสดงว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอริแฟคชันโดยใช้แก๊สไอเสีย ทำให้สูญเสียมวลอย่างมากเมื่อเทียบกับใช้แก๊สไนโตรเจน ซึ่งผลผลิตเชิงพลังงานที่มีค่าสูงกว่าผลผลิตเชิงมวลแสดงให้เห็นถึงการทอริแฟคชันที่ดีขึ้น แสดงดังตารางที่ 4

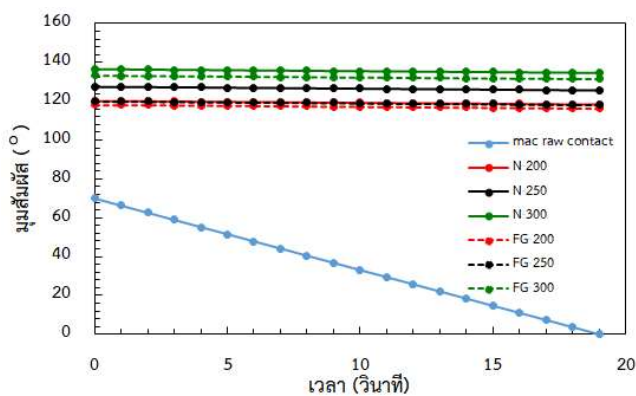
รูปที่ 10 แสดงอุณหภูมิของการทอริแฟคชันต่อผลผลิตเชิงพลังงานที่เวลา นาที จะพบว่าผลผลิตเชิงพลังงานของ 45 เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สไอเสีย มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าเชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไอเสียที่มีผลผลิตเชิงมวลน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่ใช้ไนโตรเจน แต่เชื้อเพลิงที่ใช้ไอเสียมีค่าความร้อนที่มากกว่าจึงทำให้ผลผลิตเชิงพลังงานมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงที่ใช้ไนโตรเจน ซึ่งการใช้ปริมาณผลผลิตเชิงมวลและเชิงพลังงานมาเป็นเกณฑ์ มีข้อดีในเชิงพาณิชย์เกี่ยวกับการขนส่งและการจัดเก็บเชื้อเพลิง เป็นผลมาจากเชื้อเพลิงมีปริมาณพลังงานที่สูงขึ้นต่อ 1 หน่วยมวลเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงทำให้ประหยัดพื้นที่ในการขนถ่าย การจัดส่งเชื้อเพลิงทอริแฟคชัน ซึ่งเชื้อเพลิงที่ทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียดีกว่าไนโตรเจนเนื่องจากค่าต้นทุนแก๊สที่ต่ำกว่าไนโตรเจนที่ต้องเสียค่าคัดแยกแก๊ส



รูปที่ 10 อุณหภูมิของการทอริแฟกชันต่อผลผลิตเชิงพลังงานที่ระยะเวลา 45 นาที

3.7 ลักษณะของมุมสัมผัส (Contact angle)

ลักษณะของมุมสัมผัสของเปลือกแมคคาเดเมียดิบและทอริแฟกชันแสดงดังรูปที่ 11 โดยชีวมวลดิบที่แสดงเป็นวัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อมุมสัมผัสมีขนาดเล็กกว่า ในขณะที่ 90° 90° ชีวมวลที่ไม่ชอบน้ำจะมีมุมที่มากกว่า[15] โดยมุมสัมผัสนี้เป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติการดูดซับความชื้นของชีวมวลในหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และกลุ่มคาร์บอกซิลิก (-COOH) โดยหมู่พวกนี้มีคุณสมบัติที่ทำให้ชีวมวลมีลักษณะที่ชอบน้ำ โดยพบได้ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเซลลูโลสและลิกนิน ดังนั้นกระบวนการทอริแฟกชันในช่วงอุณหภูมิ องศาเซลเซียส 300 ถึง 200 ส่งผลต่อการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจึงทำให้ชีวมวลที่ทอริแฟกชันมีลักษณะที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งส่งผลให้การดูดความชื้นกลับเข้าสู่ตัวเชื้อเพลิงต่ำ



รูปที่ 11 เวลาของการทอริแฟกชันต่อมุมสัมผัสที่ระยะเวลา 20 วินาที

ตารางที่ 5 แสดงผลของมุมสัมผัสของเปลือกแมคคาเดเมียดิบและทอริแฟกชันที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่าเปลือกแมคคาเดเมียดิบมุมสัมผัสอยู่ที่ ซึ่งเป็นพวกชอบน้ำ และมุมสัมผัส 70° ของเชื้อเพลิงทอริแฟกชันโดยไนโตรเจนและแก๊สไอเสียมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชันเพิ่มสูงขึ้น โดยมุมสัมผัสของเชื้อเพลิงที่ทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียมีมุมที่น้อยกว่าแก๊สไนโตรเจนเนื่องจากเกิดการออกซิเดชันของน้ำมันดินบนพื้นผิวของตัวถ่านในปฏิกิริยาออกซิเดชัน [15]

เมื่อเปรียบเทียบมุมสัมผัสของเปลือกแมคคาเดเมียดิบกับเชื้อเพลิงจากงานวิจัยอื่นๆ(ไม้และสาหร่าย) ซึ่งทำการอัดเม็ดแล้วทำการทอริแฟกชัน พบว่า มุมสัมผัสของเปลือกแมคคาเดเมียที่ทำการทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียและแก๊สไนโตรเจนนั้นมีค่ามุมสัมผัสที่มากกว่าวัสดุชีวมวลประเภทไม้และสาหร่าย ดังนั้น เปลือกแมคคาเดเมียที่ผ่านกระบวนการทอริแฟกชันจะมีสถานะการดูดความชื้นกลับเข้าสู่ตัวเชื้อเพลิงได้ต่ำกว่าเชื้อเพลิงประเภทไม้และสาหร่าย

ตารางที่ 5 ลักษณะมุมสัมผัสของเปลือกแมคคาเดเมียดิบและทอริแฟกชันที่ระยะเวลา 60 นาที

ตัวอย่าง	แก๊ส	N ₂	FG	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	มุมสัมผัส (°)		
ดิบ				
เปลือกแมคคาเดเมียดิบและทอริไฟต์		-	70	
	200	120	118	งานวิจัยนี้
	250	127	120	งานวิจัยนี้
	300	136	133	งานวิจัยนี้
ไม้ Poplar	200	98	-	[16]
	230	110	-	[16]
สาหร่าย (Nannochloropsis oceanica)	200	105.6	95.1	[15]
	250	119.7	115.8	[15]
	300	123.4	101.8	[15]

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษากการทอรีแฟคชันเปลือกแมคคาเดเมียภายใต้สภาวะแก๊สไอเสีย (ออกซิเจนร้อยละ 5 โดยปริมาตร) อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 30, 45 และ นาที 60 ผลจากการศึกษาใช้เปรียบเทียบกับทอรีแฟคชันโดยใช้แก๊สไนโตรเจน พบว่าอุณหภูมิทอรีแฟคชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปลือกแมคคาเดเมียที่ผ่านการทอรีแฟคชันโดยใช้แก๊สไอเสียมีผลผลิตเชิงมวล, ผลผลิตเชิงพลังงานและอัตราส่วนโดยอะตอม H/C และ O/C ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทอรีแฟคชันแฟคชันโดยแก๊สไนโตรเจน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในเชื้อเพลิง ความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์หุ้มสัมผัสระหว่างหยดน้ำและผิวชีวมวล พบว่าทอรีแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีมุมที่น้อยกว่าแก๊สไนโตรเจนเนื่องจากเกิดการออกซิเดชันของน้ำมันดินบนพื้นผิวของตัวถ่านในปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยการทอรีแฟคชันที่ องศา 300 นาที 45 เซลเซียส ระยะเวลาให้มีความร้อนสูงสุด คือ เมกะจูลต่อกิโลกรัม และค่าผลผลิตเชิง 9.30 พลังงานร้อยละ 69.4 การใช้แก๊สไอเสียในการปรับปรุงสภาพของชีวมวลช่วยให้ผลผลิตเชิงพลังงานมีค่าสูงใกล้เคียงกับการใช้แก๊สเฉื่อยและยังช่วยลดต้นทุนในการใช้แก๊สในการทอรีแฟคชันอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bui HT, Gagnon C, Audet O, Mathieu J, Leone M. Impact of a resistance training program on ataxia as measured by an innovative computer-based test: 1361 Board 154 May 28, 9: 00 AM-10: 30 AM. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2015;47(55): 362.
- [2] กรมศุลกากร. เข้าถึงได้จาก: http://www.customs.go.th/statistic_report.php?show_search=1 [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 27 ก.พ. 2564].
- [3] Mahantadsanaoing N, Ngernyen Y. Torrefaction of pelletizing fuel from solid waste of sugar industry. *Khon Kaen University Research Journal*. 2020;20(1): 65-75.
- [4] Bridgeman TG, Jones JM, Shield I, Williams PT. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*. 2008;87(6): 844-856.
- [5] Uemura Y, Omar W, Othman NA, Yusup S, Tsutsui T. Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. *Fuel*. 2013;103: 156-160.
- [6] Onsree T, Tippayawong N, Williams T, McCullough K, Barrow E, Pogaku R, Lauterbach J. Torrefaction of pelletized corn residues with wet flue gas. *Bioresource technology*. 2019;285: 121330.
- [7] Poudel J, Karki S, Oh SC. Valorization of waste wood as a solid fuel by torrefaction. *Energies*. 2018;11(7): 1641.
- [8] Chen WH, Lu KM, Lee WJ, Liu SH, Lin TC. Non - oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass. *Applied Energy*. 2014;114: 104-113.
- [9] Nhuchhen DR. Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. *Fuel*. 2016;180, 348-356.
- [10] Mei Y, Liu R, Yang Q, Yang H, Shao J, Draper C, Chen H. Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas. *Bioresource Technology*. 2015;177: 355-360.
- [11] Shankar Tumuluru J, Sokhansanj S, Hess JR, Wright CT, Boardman RD. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*. 2011;7(5): 384-401.
- [12] Pattiya A. Fast pyrolysis. Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications. *Woodhead Publishing*. 2018:3-28.

- [13] Prins MJ, Ptasinski KJ, Janssen FJ. Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2006;77(1): 28-34.
- [14] Li MF, Li X, Bian J, Xu JK, Yang S, Sun RC. Influence of temperature on bamboo torrefaction under carbon dioxide atmosphere. *Industrial Crops and Products*. 2015;76: 149-157.
- [15] Zhang C, Wang C, Cao G, Chen WH, Ho SH. Comparison and characterization of property variation of microalgal biomass with non-oxidative and oxidative torrefaction. *Fuel*. 2019;246: 375-385.
- [16] Chen WH, Lin BJ, Colin B, Chang JS, Pétrissans A, Bi X, Pétrissans M. Hygroscopic transformation of woody biomass torrefaction for carbon storage. *Applied Energy*. 2018;231: 768-776.