



การทอริแฟคชันเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟจากแก๊สไอเสียแห้งและแก๊สไนโตรเจน Torrefaction of Macadamia Shell and Coffee Endocarp with Dry Flue Gas and Nitrogen

สุภาภรณ์ กลิ่นเกสร¹ และ คณิต มานะธูระ^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

¹หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Supaporn Klinkeson and Kanit Manatura*

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

¹Moo.6 Kamphaeng Saen, Ampnur Kamphaeng Saen, Nakhon, Pathom, 73140

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kanitmana@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 06-2638-8729

Received: 11 March 2022, Revised: 25 April 2022, Accepted: 10 July 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทอริแฟคชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไอเสียแห้ง (ออกซิเจนร้อยละ 5 โดยปริมาตร) และไนโตรเจนต่อคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีและสมรรถนะทอริแฟคชัน (ผลผลิตเชิงมวล ค่าความร้อน ผลผลิตเชิงพลังงานและการสูญเสียน้ำหนัก) จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่สูงและการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียช่วยเพิ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงสามารถกำจัดความชื้นและสารระเหยบางส่วนได้มากกว่าเมื่อเทียบกับไนโตรเจน ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทอริไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟที่ผ่านการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียและไนโตรเจนมีค่าอยู่ระหว่าง 23.97-30.36 และ 25.64-30.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ 21.48-29.16 และ 24.93-29.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานจากแก๊สไอเสียมีค่าลดลงมากกว่าการใช้ไนโตรเจน การใช้แก๊สไอเสียทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ร่วมกับการทอริแฟคชันมีความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนในการปรับสภาพผลิตเชื้อเพลิงและอาจช่วยประหยัดพลังงานในหม้อไอน้ำ

คำสำคัญ ทอริแฟคชัน แก๊สไอเสีย เปลือกแมคคาเดเมีย กะลากาแฟ การสูญเสียน้ำหนัก

Abstract

The aim of this research is to study torrefaction performance of macadamia shell and coffee endocarp, at 200, 250 and 300 °C for 30 min under simulated dry-flue gases (5% oxygen by volume) and nitrogen on physical and chemical properties and torrefaction performance (mass yield, energy yield and weight loss). The study found that higher torrefaction temperature with flue gas improves oxidation reaction by releasing moisture and partially volatile matter compared to that of nitrogen. These led to raise their heating value. The calorific value of torrefied macadamia shell and coffee endocarp by flue gas and nitrogen are in range of 23.97-30.36 and 25.64-30.25 MJ/kg and 21.48-29.16 and 24.93-29.53 MJ/kg, respectively. However, higher reduction of mass yield and energy yield of the flue gas is found compared with that of nitrogen. Applying flue gas from waste heat in combustion process may reduce costs of pretreatment and potentially save energy in the boiler.

Keywords: Torrefaction, Flue gas, Macadamia shell, Coffee Endocarp, Weight Loss

1. บทนำ

ชีวมวลคือสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก องค์ประกอบหนึ่ง สามารถให้ความร้อนจากการเผาไหม้ได้ดี จึงมักนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทน [1-2] ปัจจุบันมีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปให้เกิดมูลค่าสูงขึ้นอย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแปรรูปแมคคาเดเมียดอยช้างซึ่งมีการแปรรูปเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟ ข้อมูลจากโครงการพัฒนาดอยช้างอันเนื่องมาจากพระราชดำรินี้ปี 2558 ระบุว่า การผลิตแมคคาเดเมียกว่า 60 ตันต่อปี [3] แมคคาเดเมียเป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่งที่นิยมปลูกในพื้นที่ดังกล่าว ภายในเมล็ดแมคคาเดเมียประกอบด้วยเมล็ดซึ่งนำไปรับประทานได้ และเปลือกแมคคาเดเมียสามารถนำไปทำปุ๋ยและแปลงสภาพเป็นถ่านได้

กาแฟซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ผู้คนนิยมการบริโภค จากข้อมูลการบริโภคกาแฟในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา พบว่ามีการบริโภคที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องกว่าร้อยละ 2.1 ต่อปี [4] โดยประเทศไทยมีความต้องการใช้เมล็ดกาแฟภายในประเทศอยู่ราว 95,000 ตันต่อปี [5] อุตสาหกรรมกาแฟในไทยส่วนใหญ่เป็นการแปรรูปกาแฟขั้นต้นที่นำเอาเมล็ดกาแฟดิบมาแปรรูปโดยการแยกเมล็ดกับกะลากาแฟ ออกจากกัน โดยกะลากาแฟ (Coffee Endocarp) มีลักษณะเป็นเปลือกหุ้มเมล็ด เมล็ดกาแฟจะถูกนำไปแปรรูปเพื่อการบริโภค ขณะที่กะลากาแฟส่วนใหญ่จะถูกปล่อยทิ้งเป็นขยะ

เปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟถือว่าเป็นชีวมวลประเภทที่มีความชื้นสูง ทำให้เกิดเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษา ค่าความร้อนต่ำ มีลักษณะชอบน้ำ (Hygroscopic) ลักษณะทางกายภาพไม่สม่ำเสมอและยากต่อการบดอัด ไม่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นเชื้อเพลิงแข็ง หากนำมาใช้ร่วมกับถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องผ่านการปรับปรุงสภาพ เช่น การอัดขึ้นรูปเป็นแท่ง (Densification) นอกจากนี้ อาจการทอริแฟคชันร่วมด้วยซึ่งสามารถปรับปรุงให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนมากขึ้น

การทอริแฟคชันได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงแข็งทั่วไปให้มีคุณภาพ (ค่าความร้อน)

ใกล้เคียงกับถ่านหิน [6] ทอริแฟคชันเป็นการปรับปรุงคุณภาพและการเปลี่ยนสภาพชีวมวลโดยกระบวนการทางเคมี-ความร้อนจากการให้ความร้อนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนหรือปริมาณออกซิเจนจำกัดในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ต่อหน้าที่ ระยะเวลาให้ความร้อน 30-120 นาที [7-8]

แก๊สไนโตรเจนมักถูกใช้เพื่อทำให้บรรยากาศในการทอริแฟคชันปราศจากออกซิเจน ทอริแฟคชันโดยแก๊สไนโตรเจนมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เช่น งานวิจัยของ Bridgeman et.al [9] พบว่า ค่าความหนาแน่นของพลังงานและปริมาณคาร์บอนคงที่ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนปริมาณอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง แก๊สผลิตภัณฑ์ เช่น CH_4 และ CO เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณแก๊ส CO_2 ลดลง ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชันยังมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ งานวิจัยของนราธร และ ยัวร์ตัน [10] ศึกษาการทอริแฟคชันของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส เวลา 0.5-2 ชั่วโมง พบว่าที่เวลา 30 นาที ให้ค่าผลผลิตเชิงมวลมากที่สุด

อุตสาหกรรมทางความร้อนโดยทั่วไปมักมีแก๊สไอเสียเหลือทิ้งจากการเผาไหม้ การนำแก๊สไอเสียดังกล่าวมาใช้ร่วมกับการทอริแฟคชันอาจเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการปล่อยแก๊สไอเสียทิ้งและช่วยปรับปรุงสภาพของชีวมวลไปในตัวด้วย นอกจากนี้ อาจช่วยลดต้นทุนในการแยกแก๊สไนโตรเจนออกจากอากาศในปริมาณมากได้อีกด้วย การศึกษาการทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสียมีพอสมควร เช่น Uemura et.al [11] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของออกซิเจนในแก๊สไอเสียจำลอง (ร้อยละ 0, 3, 9, 15 โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า ความเข้มข้นของออกซิเจนร้อยละ 3 ให้ค่าผลผลิตเชิงมวลใกล้เคียงกับแก๊สไนโตรเจน ขณะที่ผลผลิตเชิงพลังงานลดลงโดยความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น ปฏิกริยาออกซิเดชันของออกซิเจนในแก๊สไอเสียช่วยลดความชื้นและสารระเหยในปริมาณที่มากกว่า การใช้แก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิเดียวกัน Onsrree et.al [12] ทำการทอริแฟคชันซึ่งข้าวโพดอัดเม็ด โดยจำลองแก๊สไอเสียเปียกซึ่งประกอบด้วย H_2O ร้อยละ 0-21, CO_2 ร้อยละ 12, O_2 ร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลา 10-40



นาที่ พบว่า ปริมาณไอน้ำ (H_2O) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผลผลิตเชิงมวลมีค่าลดลง ผลผลิตแก๊สและของเหลวเพิ่ม จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่ายังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการทอริแฟกชันชีวมวลเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที เพื่อศึกษาสมรรถนะการทอริแฟกชัน ได้แก่ ผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน ค่าความร้อนที่ผ่านการทอริแฟกชัน รวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เป็นต้น ผลจากการทดลองสามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาการใช้แก๊สไอเสียร่วมกับการปรับสภาพเชื้อเพลิงแข็งในอุตสาหกรรมทางความร้อน

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แก๊สไอเสียแห้งจำลองประกอบด้วย ออกซิเจน (O_2) ร้อยละ 5, คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 10 และไนโตรเจน (N_2) ร้อยละ 85 ในการทอริแฟกชันเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที เพื่อศึกษาสมรรถนะการทอริแฟกชัน ได้แก่ ผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน ค่าความร้อนที่ผ่านการทอริแฟกชัน รวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เป็นต้น ผลจากการทดลองสามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาการใช้แก๊สไอเสียร่วมกับการปรับสภาพเชื้อเพลิงแข็งในอุตสาหกรรมทางความร้อน

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมเชื้อเพลิง

เปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพดิบนำมาจากส่วนที่เหลือทิ้งจากการผลิตในวิสาหกิจชุมชนจังหวัดเชียงราย ชีวมวลทั้ง 2 ชนิด ประมาณ 500 กรัม ถูกนำไปบดเป็นผงโดยเครื่องปั่นละเอียด Ang รุ่น SC-750T ระยะเวลา 5 นาที แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร ก่อนป้อนใส่เครื่องอัดเม็ดผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร แล้วอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดโดยใช้น้ำเป็นตัวประสานที่อัตราส่วนเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพต่อน้ำ 1:1.5 และ 1:1.2 ตามลำดับ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของเชื้อเพลิงเท่ากับ 10 และ 25 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชีวมวลอัดเม็ดถูกทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10 ชั่วโมง ก่อนนำไปทอริแฟกชัน รูปที่ 1 และ 2 แสดงเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพ ตามลำดับ

2.2 การทอริแฟกชัน

นำตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดประมาณ 100 กรัม ป้อนลงไปในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Reactor) โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อ นาทีภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนน้อยที่สุด โดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อวินาทีในการไล่

ออกซิเจนในเตาปฏิกรณ์ หลังจากนั้นสร้างบรรยากาศด้วยแก๊สไอเสีย (ออกซิเจนร้อยละ 5 โดยปริมาตร) โดยมีฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งให้ความร้อนและมีเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ การศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิทอริแฟกชันที่ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที หลังเสร็จการทดลองทำการเก็บและชั่งน้ำหนัก ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟกชัน ก่อนนำไปไว้ในภาชนะที่ปิดผนึกเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบเชิงปริมาณและละเอียด การทดลองดังกล่าวทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง ก่อนนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการคำนวณสมรรถนะต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 เปลือกแมคคาเดเมีย (ก) ดิบ (ข) อัดเม็ด (ค) ทอริแฟกชันที่ 200 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 กะลาจากแพ (ก) ดิบ (ข) อัดเม็ด (ค) ทอริแฟกชันที่ 200 องศาเซลเซียส



2.3 สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

สมบัติทางกายภาพและเคมีของชีวมวลอัดเม็ดถูกวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณเป็นการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย เถ้า และความชื้นของชีวมวล โดยความชื้นใช้มาตรฐาน EN 15414-3:2011 (European Committee for Standardization, 2011) สารระเหยและปริมาณเถ้าใช้ตัวอย่างที่หาปริมาณความชื้นแล้ววิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 15402:2011, EN 15403:2011 ตามลำดับ จะได้ค่าในฐานมวลแห้ง (Dry basis) ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัว คำนวณได้จาก 100 – ผลรวมร้อยละปริมาณเถ้าและร้อยละปริมาณสารระเหย ค่าความร้อนของชีวมวลทดสอบจากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter, LECO รุ่น AC-500) ตามมาตรฐาน ASTM D5865

การวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate Analysis) สามารถประยุกต์ใช้สมการของ Nhuchhen, D. R. [13] โดยใช้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (สารระเหย (VM), คาร์บอนคงตัว (FC) ชีเถ้า (A)) เพื่อหาสัดส่วนของธาตุในตัวอย่าง ได้แก่ ร้อยละคาร์บอน (C) ร้อยละไฮโดรเจน (H) ร้อยละออกซิเจน (O) ดังสมการ (1), (2) และ (3)

$$C = 1.0396FC + 0.0757VM^{1.3773} \quad (1)$$

$$H = 55.3678 - 0.4830VM - 0.5319FC - 0.5600A \quad (2)$$

$$O = -0.0198FC + 0.7244VM^{0.9239} \quad (3)$$

2.4 สมรรถนะการทอริแฟคชั่น

ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่นแล้วสามารถประเมินสมรรถนะการทอริแฟคชั่นได้ในรูปของ ผลผลิตเชิงมวล ผลผลิตเชิงพลังงาน การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน การสูญเสียของน้ำหนัก ดังนี้

ผลผลิตเชิงมวล (Mass Yield, MY) คือ อัตราส่วนระหว่างชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่นต่อชีวมวลดิบ แสดงให้เห็นถึงผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการ โดยน้ำหนักของชีวมวลประเมินได้จากการชั่งน้ำหนัก

$$MY (\%) = \frac{m_t}{m_o} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ m_t คือ มวลของเชื้อเพลิงหลังทอริแฟคชั่น (กรัม) และ m_o คือ มวลของเชื้อเพลิงก่อนทอริแฟคชั่น (กรัม)

ความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy Density, ED) คือ อัตราส่วนของพลังงานระหว่างชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชั่นกับชีวมวลดิบ

$$ED (-) = \frac{HHV_t}{HHV_o} \quad (5)$$

HHV_t คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหลังทอริแฟคชั่น (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) และ HHV_o คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก่อนทอริแฟคชั่น (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

ผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy Yield, EY) เป็นตัวบ่งชี้ถึงพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในชีวมวลหลังจากการทอริแฟคชั่น ซึ่งขึ้นอยู่กับ MY และ ED

$$EY (\%) = MY \times ED \quad (6)$$

การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน (Carbon Enrichment, CE) แสดงปริมาณคาร์บอนหลังจากกระบวนการทอริแฟคชั่นต่อชีวมวลดิบ ซึ่งปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น [14]

$$CE = \frac{C_t}{C_o} \quad (7)$$

โดย C คือ ปริมาณของคาร์บอนจากการวิเคราะห์โดยละเอียด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ตัวห้อย t และ o แสดงถึงการทอริแฟคชั่นและการไม่ทอริแฟคชั่น ตามลำดับ

การสูญเสียของน้ำหนัก (Weight loss, WL) แสดงถึงปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียระหว่างการทอริแฟคชั่น

$$WL (\%) = 100 - MY \quad (8)$$

3. ผลวิจัยและอภิปรายผล

ผลวิเคราะห์ของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาจากแพที่ผ่านการทอริแฟคชั่นภายใต้แก๊สไอเสีย ถูกวิเคราะห์ในรูปของคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ รวมถึงสมรรถนะการทอริแฟคชั่น ดังต่อไปนี้



3.1 คุณสมบัติของชีวมวล

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และแยกธาตุ ไฮโดรเจนเซลลูโลส และค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมีย และกะลากาแฟดิบ จากตารางพบว่า ปริมาณสารระเหยของเปลือกแมคคาเดเมียมีปริมาณมากถึงร้อยละ 81 ขณะที่ไม้ซี้เล้าอยู่ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักเท่านั้น นอกจากนั้นเปลือกแมคคาเดเมียมาแปลงสภาพเป็นถ่านทอไรไฟด์แล้ว อาจยังสามารถนำไปทำเป็นน้ำมันชีวภาพได้อีกด้วย ค่าความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมียยังสูงกว่าค่าความร้อนของกะลากาแฟเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณลิกนินที่มากกว่า [15]

การทอไรแฟคชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟสามารถลดค่าความชื้นและสารระเหยบางส่วนเนื่องจากเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมักสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส [16] โดยเป็นการทำลายหมู่ -OH ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) [16] และการทอไรแฟคชันโดยแก๊สไอเสียที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้ได้ความชื้นและสารระเหยได้ต่ำกว่าการใช้ไนโตรเจนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [17]

ตารางที่ 2 แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผ่านการทอไรแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย (FG) เทียบกับการทอไรแฟคชันโดยใช้ไนโตรเจน (N_2) พบว่า ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงมากกว่าการทอไรแฟคชันโดยไนโตรเจน เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและปฏิกิริยาออกซิเดชันในแก๊สไอเสีย นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณ C เพิ่มขึ้น ขณะที่ H และ O ลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่านการทอไรแฟคชันนั้นมีค่าสูงกว่าชีวมวลดิบ [15-17]

3.2 สมรรถนะการทอไรแฟคชัน (Torrefaction Performance)

สมรรถนะการทอไรแฟคชันที่อุณหภูมิ 300 ถึง 200) องศาเซลเซียส สามารถแสดงในรูปของผลผลิตเชิงมวล (Mass Yield) ค่าความร้อนของชีวมวลหลังทอไรแฟคชัน (HHV) และผลผลิตเชิงพลังงาน (Energy Yield) โดยสมรรถนะการทอไรแฟคชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลากาแฟโดยใช้แก๊สไอเสียและไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ รูปที่ 3 แสดงค่าผลผลิตเชิงมวลจากการทอไรแฟคชันด้วยแก๊สไอ (ก) เสียและไนโตรเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเกิดการสลายตัว

ของความชื้นและสารระเหยบางส่วนในเฮมิเซลลูโลสทำให้ผลผลิตเชิงมวลมีค่าลดลง [16]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลดิบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

การวิเคราะห์	เปลือกแมคคาเดเมีย	กะลากาแฟ
การวิเคราะห์เชิงปริมาณ		
สารระเหย	81.04	72.17
คาร์บอนคงตัว	12.24	15.66
ความชื้น	6.5	10.57
ซี้เล้า	0.21	1.60
การวิเคราะห์แยกธาตุ		
คาร์บอน	44.93	42.81
ไฮโดรเจน	9.59	5.29
ไนโตรเจน	0.19	12.79
ออกซิเจน	40.48	39.11
การวิเคราะห์องค์ประกอบ		
เฮมิเซลลูโลส	3	8
เซลลูโลส	37	49
ลิกนิน	46.33	27.36
HHV ($MJ \cdot kg^{-1}$ dry basis)	21.47	20.08

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของชีวมวลที่ผ่านการทอไรแฟคชันที่ 200 องศาเซลเซียส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ชีวมวล	$^1MC-N_2$	MC-FG	$^2CF-N_2$	CF-FG
การวิเคราะห์เชิงปริมาณ				
สารระเหย	74.22	69.22	70.11	62.81
คาร์บอนคงตัว	20.08	27.03	18.08	32.23
ความชื้น	2.20	1.53	2.51	0.85
ซี้เล้า	2.57	2.21	3.29	4.11
การวิเคราะห์แยกธาตุ				
คาร์บอน	49.42	59.44	51.43	56.18
ไฮโดรเจน	4.25	7.34	6.84	5.59
ไนโตรเจน	24.08	8.36	5.44	5.67
ออกซิเจน	28.40	24.84	36.28	32.56
HHV ($MJ \cdot kg^{-1}$ dry basis)	22.48	23.97	24.93	25.64

1MC : เปลือกแมคคาเดเมีย , 2CF : กะลากาแฟ

ผลผลิตเชิงมวลจากการใช้แก๊สไอเสียมีค่าน้อยกว่าไนโตรเจนที่อุณหภูมิเดียวกัน บ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิ



เดชันจากออกซิเจนในแก๊สไอเสีย ความแตกต่างระหว่างทอริแฟกชันของแก๊สทั้งสองมีค่าค่อนข้างสูงที่ 200 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งเท่ากับร้อยละ 13.5 และ 20 ตามลำดับ ขณะที่ 300 องศาเซลเซียส ความแตกต่างดังกล่าวแทบไม่พบ อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยา Boudouard จากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในแก๊สไอเสียที่อุณหภูมิทอริแฟกชันสูงขึ้นส่งผลให้ลักษณะการสลายตัวใกล้เคียงกับแก๊สไนโตรเจน [14]

ผลจากการลดลงของผลผลิตเชิงมวลทำให้ค่า HHV สูงขึ้น ดังรูปที่ 3 (ข) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอริแฟกชันเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของพลังงานในชีวมวล ค่า HHV จากการทอริแฟกชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพโดยแก๊สไอเสียมีค่ามากกว่าการทอริแฟกชันโดยใช้ไนโตรเจน เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Zhang et.al [17]

รูปที่ 3 (ค) แสดงผลผลิตเชิงพลังงานมีแนวโน้มเดียวกับผลผลิตเชิงมวลและตรงข้ามกับค่า HHV เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (6) จะสังเกตได้ว่าผลผลิตเชิงพลังงานขึ้นอยู่กับผลผลิตเชิงมวลมากกว่าค่า HHV

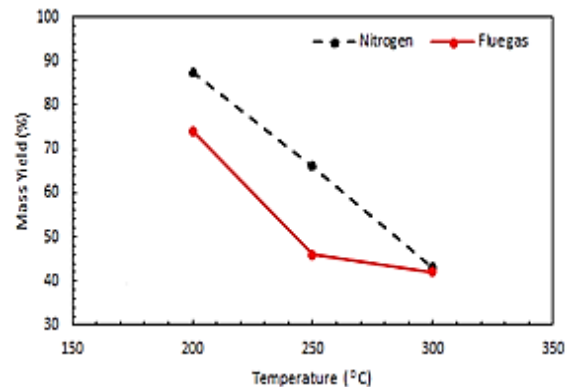
รูปที่ 4 (ก)-(ค) แสดงผลผลิตเชิงมวล ค่า HHV และผลผลิตเชิงพลังงานของกะลาปากแพ สังเกตได้ว่ามีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกรณีของเปลือกแมคคาเดเมียดังรูปที่ 3 (ก)-(ค) อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเชิงมวลของกะลาปากแพ (รูปที่ 4 (ก)) มีค่าน้อยกว่าผลผลิตเชิงมวลของเปลือกแมคคาเดเมีย อาจเนื่องมาจากปริมาณลิกนินในกะลาปากแพ (ร้อยละ 27.36) ที่น้อยกว่าเปลือกแมคคาเดเมีย (ร้อยละ 46.33)

3.3 การเพิ่มขึ้นของคาร์บอน (CE, Carbon Enhancement)

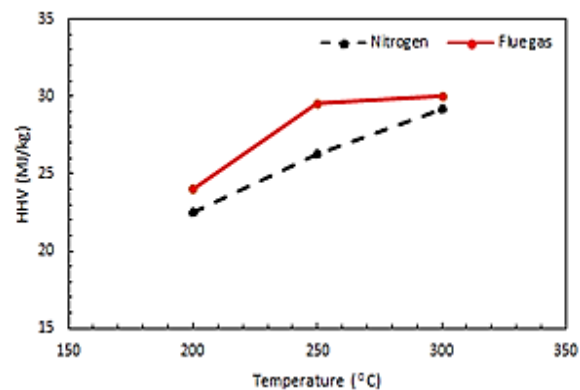
การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอน (CE) ที่ผ่านการทอริแฟกชันแสดงดังสมการที่ (7) ปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงจะส่งผลถึงค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [14] ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3 (ข) และ 4 (ข)

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักที่ (Weight loss, WL) กับ CE มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ค่าความน่าเชื่อถือระหว่าง 0.88 ถึง 0.99 เมื่อ CE มีค่าสูงขึ้น (อุณหภูมิทอริแฟกชันสูงขึ้น) ส่งผลให้ WL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเกิดจากการสูญเสียสารระเหยและน้ำในเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาผลการทอริแฟกชันภายใต้แก๊สไอเสียและไนโตรเจน

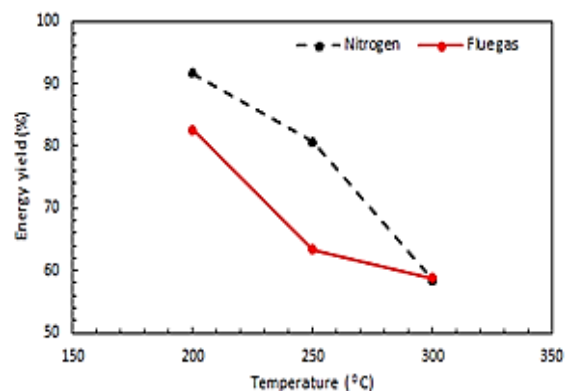
สำหรับชีวมวลทั้งสอง พบว่า การทอริแฟกชันของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพโดยใช้แก๊สไนโตรเจนจะมีค่า CE น้อยกว่าการใช้แก๊สไอเสียและค่าความชื้นของทอริแฟกชันด้วยแก๊สไอเสียมีค่าน้อยกว่าของไนโตรเจน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ CE มีผลต่อ WL ภายใต้แก๊สไนโตรเจนมากกว่าแก๊สไอเสีย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Uemura et.al [14]



(ก)

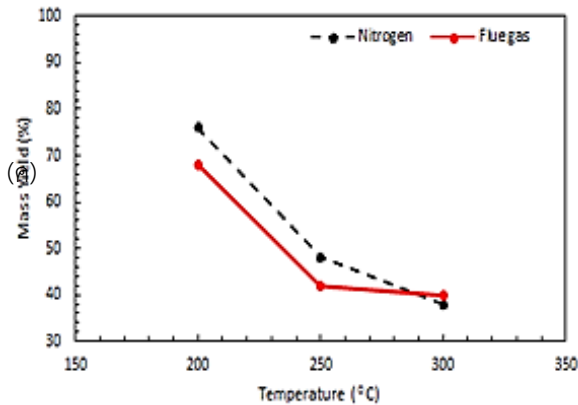


(ข)

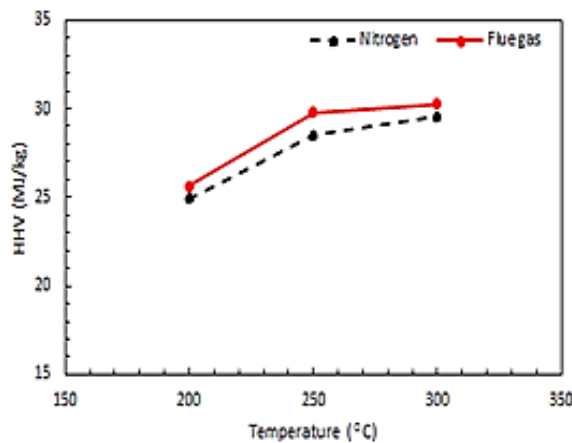


(ค)

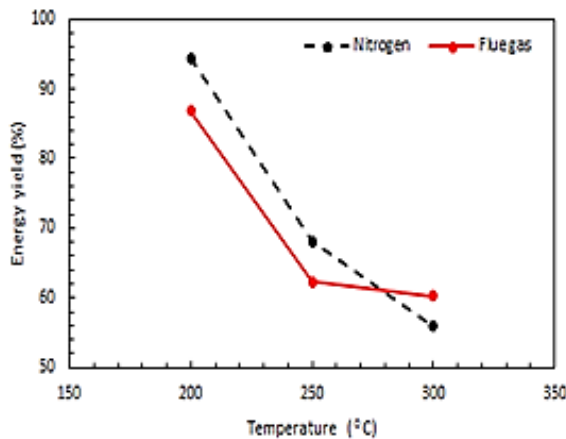
รูปที่ 3 (ก) ผลผลิตเชิงมวล (ข) ค่าความร้อน และ (ค) ผลผลิตเชิงพลังงานของเปลือกแมคคาเดเมีย



(ก)



(ข)

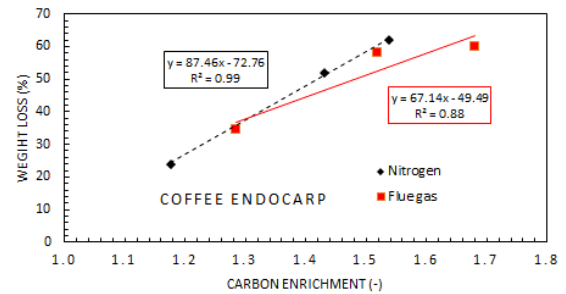
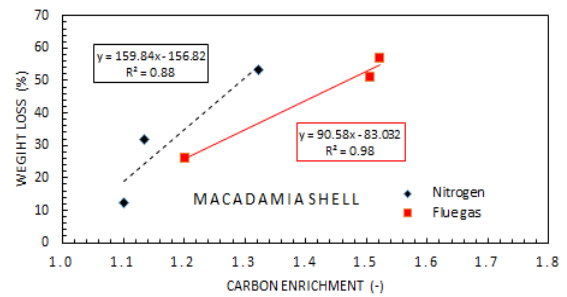


(ค)

รูปที่ 4 (ก) ผลผลิตเชิงมวล (ข) ค่าความร้อน และ (ค) ผลผลิตเชิงพลังงานของกะลาปากแพ

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทอริแฟกชันเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพภายใต้สภาวะแก๊สไอเสียแห้งที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จากผลการทดลอง พบว่า



รูปที่ 5 ผลของการเพิ่มของคาร์บอนต่อการสูญเสียน้ำหนักสำหรับเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพ

1. อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อผลผลิตเชิงมวล สารระเหย และความชื้นที่ลดลง ส่งผลต่อค่าความร้อนและปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น

2. ผลผลิตเชิงมวลและผลผลิตเชิงพลังงานภายใต้การทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าน้อยกว่าการทอริแฟกชันโดยแก๊สไนโตรเจน เนื่องจากออกซิเจนในแก๊สไอเสียทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และส่งผลให้ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น

3. เปลือกแมคคาเดเมียหลังจากทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียมีค่าความร้อนมากกว่ากะลาปากแพเนื่องจากมีปริมาณลิกนินมากกว่า

4. ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับการสูญเสียน้ำหนักในการทอริแฟกชันด้วยแก๊สทั้ง 2 ชนิด โดยส่งผลกระทบที่การทอริแฟกชันโดยใช้ไนโตรเจนมากกว่าแก๊สไอเสีย การทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสียอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงสภาพชีวมวลก่อนกระบวนการทางความร้อน เช่น การเผาไหม้หรือแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ดัง ตารางที่ 3 พบว่า กะลาปากแพและเปลือกแมคคาเดเมียที่ทอริแฟกชันโดยแก๊สไอเสีย สามารถผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเทียบเท่ากับวัสดุชีวมวลประเภทไม้ ดังนั้น การนำเปลือกแมคคาเดเมียมาอัดเม็ดแล้วทำการทอริแฟกชัน โดย



แก๊สไอเสียเป็นการเพิ่มมูลค่าของชีวมวล, เพิ่มค่าความร้อน และเป็นการใช้แก๊สไอเสียให้เกิดประโยชน์อีกด้วย คุณภาพของแก๊สไอเสียและการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ควรถูกพิจารณาประกอบในการประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 3 ค่าความร้อนเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

ตัวอย่าง	ค่าความร้อน (MJ/kg)	อ้างอิง
เปลือกแมคคาเดเมียทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย	23.97	งานวิจัยนี้
กะลาปากแพทอริแฟคชันโดยแก๊สไอเสีย	25.64	งานวิจัยนี้
ซังข้าวโพดอัดเม็ด (H ₂ O ร้อยละ 0-21, CO ₂ ร้อยละ 12, O ₂ ร้อยละ 5)	17-23	Zhang et. al (2019) [17]
ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทอริแฟคชันไดโนไนโตรเจน	16.55-25.79	นราธร และ ยวรัตน์ (2020) [10]
ไม้การบูรทอริแฟคชันโดยไดโนไนโตรเจน	18.9 - 22.4	Cao et.al (2015) [18]

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ได้สนับสนุนงบประมาณทุนวิจัยสำหรับโครงการวิจัยเรื่อง “การทอริแฟคชันภายใต้แก๊สไอเสียของเปลือกแมคคาเดเมียและกะลาปากแพ”

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rokni E, Ren X, Panahi A, Levendis YA. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. Fuel. 2018 Jan;211:363–74.
- [2] Dudley B. BP statistical review of world energy. BP Statistical Review, London, UK, 2018. Available from: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/news-and-insights/speeches/bp-statistical-review-of-world-energy-2018.pdf> Accessed 6th August 2018].
- [3] Kaewpad K, Suktakjan K, Pipatnapipop C, Munnasak S. Angular Rotary Macadamia Nut Cracker Machine. RMUTP Research Journal, 2016;10(2). Thai.
- [4] Bates RH. "Five. The International Coffee Organization: An International Institution". Analytic Narratives, Princeton: Princeton University Press, 1999;194-230.
- [5] Coffee production business. Department of Business Development. Available from: https://www.dbd.go.th/download/document_file/Statistic/2562/T26/T26_201901.pdf [Accessed 19th September 2021].
- [6] Onsree T, Tippayawong N, Williams T, McCullough K, Barrow E, Pogaku R, Torrefaction of pelletized corn residues with wet flue gas. Bioresour Technol. 2019;285:121330.
- [7] Bach QV, Skreiberg Ø. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. Renew Sustain Energy Rev. 2016 Feb;54:665–77.
- [8] Sukiran MA, Abnisa F, Wan Daud WMA, Abu Bakar N, Loh SK. A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. Energy Convers Manag. 2017 Oct;149:101–20.
- [9] 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 May;87 (6): 844–56.
- [10] Mahantadsanapong N, Ngernyen Y. Torrefaction of Pelletizing Fuel from Solid Waste of Sugar Industry. KKU Research Journal (Graduate Studies). 2020;20(1):65-75. Thai.
- [11] Uemura Y, Omar W, Othman NA, Yusup S, Tsutsui T. Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. Fuel. 2013 Jan;103:156–60.



- [12] 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.
- [13] Nhuchhen DR. Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. *Fuel*. 2016 Sep;180:348–56.
- [14] Uemura Y, Saadon S, Osman N, Mansor N, Tanoue K ichiro. Torrefaction of oil palm kernel shell in the presence of oxygen and carbon dioxide. *Fuel*. 2015 Mar;144:171–9.
- [15] Sharma S Meena R, Sharma A, Goyal P kumar. Biomass Conversion Technologies for Renewable Energy and Fuels: A Review Note. *IOSR J. Mech Civ Eng*. 2014;11(2):28–35.
- [16] Bergman PC, Kiel JH. Torrefaction for biomass upgrading. In *Proc. 14th European Biomass Conference*, Paris, France 2005 Oct 17; 2005. p. 17-21.
- [17] Zhang C, Ho SH, Chen WH, Fu Y, Chang JS, Bi X. Oxidative torrefaction of biomass nutshells: Evaluations of energy efficiency as well as biochar transportation and storage. *Appl Energy*. 2019 Feb;235:428–41.
- [18] Cao L, Yuan X, Li H, Li C, Xiao Z, Jiang L, et al. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresour Technol*. 2015 Jun;185:254–62.