

การปรับปรุงสมบัติทางเคมีความร้อนของชีวมวลข้าวโพดด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน Improvements of Thermochemical Properties of Corn Biomass by Torrefaction Process

จารุณี เข้มพิลำ^{1*} และ ภูมินทร์ คงโต²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000

²สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ถนนกาญจนาภิเษย ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

E-mail: jarunee.kh@rmu.ac.th

Jarunee Khempila^{1,*} and Pumin Kongto²

¹Physics Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University

Nakhonsawan Road, Talad Sub-district, Mueang District, Maha Sarakham 44000, Thailand

²Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Karnjanavanit Road, Kho Hong Sub-district, Hat Yai District, Songkhla 90110, Thailand

E-mail: jarunee.kh@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

การเผาไหม้และลำต้นข้าวโพดภายหลังการเก็บเกี่ยวเป็นวิธีปฏิบัตินิยมในประเทศไทยซึ่งก่อปัญหาฝุ่นละอองและมลพิษทางอากาศ เพื่อแก้ปัญหานี้การเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าในรูปของเชื้อเพลิงแข็งจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลข้าวโพด (ใบและลำต้นข้าวโพด) ซึ่งอุณหภูมิในปฏิกิริยามีค่าอยู่ระหว่าง 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันส่งผลให้ผลได้ผลิตภัณฑ์และผลได้พลังงานมีค่าลดลงจากร้อยละ 79.85 และ 87.62 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็น 47.40 และ 63.36 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่พบความหนาแน่นพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.56 เป็น 33.68 นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันทำให้ความชื้นลดลงส่งผลให้องค์ประกอบในกลุ่มที่เผาไหม้ได้มีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการลดลงของหมู่ไฮดรอกซิล, ปริมาณออกซิเจน และไฮโดรเจนในขณะที่ปริมาณคาร์บอนมีค่าสูงขึ้นเป็นร้อยละ 59.65 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอน บ่งชี้ว่าชีวมวลข้าวโพดที่ผ่านการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสมีศักยภาพใกล้เคียงถ่านหิน นอกจากนี้ ค่าความร้อนสูงของชีวมวลข้าวโพดดิบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 19.60 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เป็น 23.80 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าทอรรีแฟกชันเป็น

กระบวนการเชิงเคมีความร้อนมีศักยภาพในการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลข้าวโพดให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณภาพสูงขึ้นได้

คำสำคัญ: ทอรรีแฟกชัน; ชีวมวลข้าวโพด; ไบโอชาร์

Abstract

In Thailand, post-harvest burning of corn stover residue is a preferred practice, causing particulate matter emissions and air pollution. To curtail this problem, converting them to value-added products such as solid fuel is desirable. In this research, the effects of torrefaction temperature on the physical and chemical properties of corn stover (Corn leave and straw) were investigated. The reaction temperatures were between 250°C and 300°C. The results indicated that with an increase in the torrefaction temperature, the mass yield and energy yield decreased from 79.85 and 87.62% at 250°C to 47.40 and 63.36% at 300°C, respectively. While found an increase in energy densification from 9.56 % to 33.68 %. In addition, increasing torrefaction temperature, the moisture content of the samples reduced. Resulting in an increase in the combustible forms which is in line with the reduction of the number of hydroxyl groups (O-H), the hydrogen and oxygen content, while the fixed carbon fraction in the sample increases to 59.65% derived at 300 °C. The H/C and O/C ratios calculated at 300°C indicated that the value was closer to Lignite. Additionally, the higher heating value of raw corn stover improved significantly from 19.60 MJ/kg to 23.80 MJ/kg derived at 300°C. Based on this study, thermochemical torrefaction has the potential of improving corn stover as solid biofuels.

Keywords: Torrefaction; Corn stover biomass; Biochar

1. บทนำ

ฝุ่นละอองขนาดเล็กและหมอกควัน เป็นปัญหาเร่งด่วนระดับชาติที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม รวมถึงการดำรงชีวิตและสุขภาพของประชาชน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของยานพาหนะในการคมนาคม และขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม ฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง การเผาในที่โล่ง เช่น การเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูก [1] จากแผนปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระแห่งชาติ เรื่องการแก้ไขมลพิษด้านฝุ่นละอองของ กรมควบคุมมลพิษ [2] ปี พ.ศ. 2562 รายงานเรื่องการเผาในที่โล่งซึ่งวิเคราะห์จากการใช้ประโยชน์ที่ดินพบว่า มีจุดความร้อนสะสม (Hotspot) มากกว่าร้อยละ 69 ในพื้นที่ทำการเกษตร แม้จะมีการป้องกันและบรรเทาให้หยุดเผา แต่ยังคงไม่สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้เนื่องจากการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรส่งผลให้ต้นทุนมีค่าสูงขึ้น

ทำให้เกษตรกรบางรายเลือกที่จะเผาเพื่อลดค่าใช้จ่ายในส่วนดังกล่าว หรือลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ลาดชันทำให้ไม่สามารถใช้วิธีไถกลบได้

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นชีวมวลประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการ ตั้งแต่การเพาะปลูก เก็บเกี่ยวและแปรรูปผลผลิต ประเทศไทยนั้นเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพืชเศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ยางพารา ปาล์ม น้ำมัน อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง [3] ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์รวมทั้งประเทศในปีเพาะปลูก 2558/59 มีปริมาณ 4,029,198 ตัน และเพิ่มขึ้นเป็น 5,5069,413 ตัน ในปีเพาะปลูก 2561/62 เมื่อพิจารณาพื้นที่เพาะปลูกในปี พ.ศ. 2563 พบว่าร้อยละ 88 ของพื้นที่ปลูกข้าวโพดทั้งประเทศอยู่ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [4] และภาคเหนือ ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวโพด จะเกิดเศษเหลือทางการเกษตรแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ (1) ลำต้นและใบ (2) เปลือกข้าวโพด และ (3) ชังข้าวโพด ซึ่งแต่ละประเภทมีค่าสัดส่วนชีวมวลต่อผลผลิต (Residue to product ratio; RPR) เป็น 1.59, 0.20 และ 0.29 ตามลำดับ เมื่อเทียบสัดส่วนจากปริมาณผลผลิตข้าวโพดในปีเพาะปลูก 2561/62 พบว่ามีปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งประเภทลำต้นและใบ 8,060,367 ตัน เปลือกข้าวโพด 1,013,883 ตัน และชังข้าวโพด 1,470,130 ตัน ซึ่งลำต้นและใบข้าวโพดเป็นชีวมวลที่เหลือทิ้งในพื้นที่การเกษตรมากที่สุด อีกทั้งเกษตรกรมักนิยมกำจัดด้วยการเผาในที่โล่งแจ้งก่อให้เกิด การรับอนุมอนอกไซค์ ออกไซค์ของไนโตรเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และฝุ่น [5] ดังนั้นหากนำชีวมวลเหลือทิ้งในพื้นที่ปลูกดังกล่าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนอกจากจะช่วยลดการเผาไหม้ที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองและหมอกควันซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยเพิ่มสัดส่วนของพลังงานทดแทนตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) [6] หรือเพิ่มสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวลตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 (Power Development Plan: PDP 2018) [7] ได้อีกทางหนึ่ง การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวก น้ำมัน ถ่านหิน หรือก๊าซธรรมชาติ คือ เชื้อเพลิงชีวมวลไม่ก่อให้เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในชั้นบรรยากาศ [8] ในขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลมีองค์ประกอบคาร์บอนสูง เมื่อเผาไหม้ทำให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษในรูป CO_2 ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกแล้วนั้นยังส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ดีเชื้อเพลิงจากชีวมวลยังมีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่า เช่น ความชื้นสูง ค่าความร้อนต่ำ ความหนาแน่นพลังงานต่ำ เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพขณะจัดเก็บ [9-12] ซึ่งข้อด้อยเหล่านี้สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวล เช่น การเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อน (Thermo-chemical) หรือการเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (Bio-chemical) [13] โดยกระบวนการเปลี่ยนรูปที่เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับสมบัติ ลักษณะทางกายภาพของวัสดุและรูปแบบของผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อน ประกอบด้วย ทอรรีแฟกชัน (Torrefaction), ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal), ลิควิแฟกชัน (Liquefaction), ไพโรไลซิส (Pyrolysis), คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization), แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และ การเผาไหม้ (Combustion) โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน [14] ซึ่งการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของก๊าซและของเหลวมากกว่าของแข็ง [15] สำหรับเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้สำหรับเผาไหม้โดยตรง

หรือเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแล้ว กระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่ผลิตภัณฑ์หลักอยู่ในรูปของแข็งสามารถนำไปเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงแข็งอื่นได้ซึ่งกำลังได้รับการศึกษาวิจัยเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน [16] กระบวนการดังกล่าวช่วยลดข้อจำกัดของชีวมวลเช่น ความชื้นสูง, ค่าความร้อนต่ำ, ความหนาแน่นพลังงานต่ำ รวมถึงเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพขณะจัดเก็บ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและขนส่งสูง และปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลให้ดีขึ้นได้

กระบวนการทอรรีแฟกชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลทางเคมีความร้อนซึ่งให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจนหรือจำกัดออกซิเจนด้วยการ purging ด้วยก๊าซเฉื่อยหรือก๊าซที่มีสมบัติเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เพื่อสร้างสภาวะ Non-oxidizing ป้องกันการเกิด Oxidation reaction ของออกซิเจนในอากาศกับชีวมวล ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปชีวมวล 30-120 นาที [17,18] ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี 3 ประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์หลักซึ่งเป็นของแข็ง เรียกว่า ไบโอชาร์ (Biochar) หรือชีวมวลทอรรีไฟด์ (Torrefied biomass) ผลิตภัณฑ์ที่เหลือมีสถานะเป็นก๊าซซึ่งประกอบด้วยก๊าซที่ควบแน่นได้หรือของเหลว และก๊าซที่ควบแน่นไม่ได้ [18,19] สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์จากการทอรรีแฟกชันจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สมบัติของชีวมวลดิบแต่ละชนิด อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ ประเภทของเตาปฏิกรณ์ และประเภทของการทอรรีแฟกชัน [20-23] ซึ่งหลังจากผ่านการทอรรีแฟกชัน ชีวมวลทอรรีไฟด์จะมีความชื้นลดลง ค่าความร้อนสูงขึ้น ความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น ความชื้นกลับได้ต่ำลงทำให้ลดการย่อยสลายทางชีวภาพขณะจัดเก็บ บดง่ายและใช้พลังงานในการบดน้อยลง [24,25]

เนื่องจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันในประเทศไทยยังไม่แพร่หลาย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะใช้กระบวนการนี้ในการปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงจากชีวมวลข้าวโพด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทอรรีแฟกชันชีวมวลข้าวโพดในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที โดยศึกษาสมบัติของชีวมวลที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชัน เช่น ผลได้ผลิตภัณฑ์, ผลได้พลังงาน, ความหนาแน่นพลังงาน, ปริมาณความชื้น, ปริมาณเถ้า, องค์ประกอบแบบละเอียด, ค่าความร้อน และ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวล โดยพิจารณาส่วนที่เหลือทิ้งของข้าวโพดในพื้นที่ปลูกได้แก่ ลำต้นและใบ โดยเรียกรวมว่าชีวมวลข้าวโพดเพื่อประยุกต์ใช้เผาไหม้ทดแทนเชื้อเพลิงแข็ง, ใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงแข็งประเภทอื่น หรือใช้เผาไหม้ร่วมกับถ่านหินช่วยลดการใช้และการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดมลพิษจากฝุ่นละอองและหมอกควันได้อีกทางหนึ่ง

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

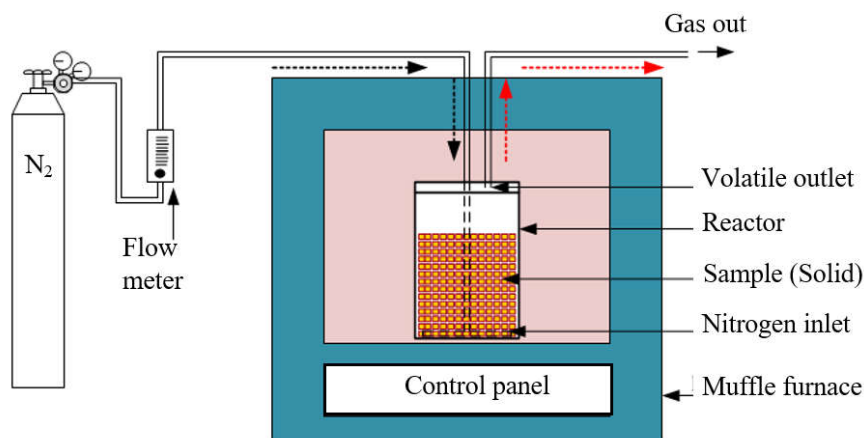
2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ชีวมวลข้าวโพดที่ใช้คือ ส่วนของใบและลำต้นแห้งที่เหลือทิ้งในพื้นที่ปลูกหลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการทดลองเก็บจากพื้นที่ปลูกในจังหวัดมหาสารคาม ชีวมวลตัวอย่างผ่านการลดความชื้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้ตัวอย่างมีความชื้นเท่ากันในทุกสภาวะการทดสอบ หลังจากลดความชื้นแล้วลด

ขนาดชีวมวลข้าวโพดด้วยเครื่องบดหยาบและบดละเอียด และใช้ตะแกรงร่อนแยกให้ได้ขนาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร เก็บใส่ถุงกันความชื้น (Ziplock) นำตัวอย่างชีวมวลข้าวโพดบางส่วนมาทำการวิเคราะห์ความชื้นด้วยการอบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบแบบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า พงชีวมวลข้าวโพดละเอียดที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์สมบัติมีความชื้นร้อยละ 7.30 ± 0.25

2.2 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน

อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเทอร์รีแฟกชันชีวมวลข้าวโพดประกอบด้วย เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) พร้อมชุดควบคุมการทำงาน (Control system) เตาปฏิกรณ์ (Reactor) ถังไนโตรเจน (Nitrogen tank) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการทดลองของกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน

2.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ขั้นตอนและวิธีการสำหรับเทอร์รีแฟกชันชีวมวลข้าวโพด เริ่มจากนำชีวมวลข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นและลดขนาดจากขั้นตอนที่ 2.1 มาชั่งน้ำหนักประมาณ 20 กรัม ใส่ในเตาปฏิกรณ์ทรงกระบอกที่เป็นระบบปิดซึ่งทำจากสแตนเลส นำชุดปฏิกรณ์วางในเตาเผาอุณหภูมิสูง ต่อท่อทางเข้าของก๊าซไนโตรเจนโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล และท่อทางออกของก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน ดังปรากฏในรูปที่ 1 ปิดเตาเผาและเปิดวาล์วควบคุมการไหลของก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เพื่อให้เกิดสภาวะไร้ออกสภาวะในเตาปฏิกรณ์หรืออยู่ในสภาวะอับอากาศก่อนให้ความร้อนประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นเปิดใช้งานเตาเผาอุณหภูมิสูงโดยตั้งอุณหภูมิของเตาไว้ที่ 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนด ลงที่ไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยยังคงอัตราการไหลของไนโตรเจนไว้คงที่ตลอดการทดลอง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการและอุณหภูมิภายในเตาลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจน ชั่งน้ำหนักของชีวมวลเทอร์รีไฟด์ที่เหลืออยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ และเก็บรักษาใน

ผู้ควบคุมความชื้นเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่อไป จากนั้นทำการทดลองโดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิของเตาสูงขึ้นเป็น 275 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ละเงื่อนไขการทดลองจะทำซ้ำ 2 ครั้ง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.4 การหาผลได้ผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันนั้นเป็นของแข็ง (Solid yield) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เหลือมีสถานะเป็นก๊าซ (Gas yield) ซึ่งประกอบด้วยก๊าซที่ควบแน่นได้ (Condensable gases) หรือของเหลว และก๊าซที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-condensable gases) ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) [26] ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เหลือคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\text{Mass yield (\%)} = \left(\frac{m_{tor}}{m_{raw}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Gas yield (\%)} = 1 - \left(\frac{m_{tor}}{m_{raw}} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ m_{raw} และ m_{tor} คือ มวลของชีวมวลข้าวโพด (กรัม) และชีวมวลข้าวโพดทอรรีไฟด์ (กรัม) ตามลำดับ

2.5 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลข้าวโพดและชีวมวลข้าวโพดทอรรีไฟด์

2.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและเถ้า

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและเถ้าของชีวมวลดิบและชีวมวลทอรรีไฟด์ยึดแนวทางตามมาตรฐาน ASTM D 3173 Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke และ ASTM D 317 Standard Test Methods for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal ตามลำดับ

2.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดและค่าความร้อน

องค์ประกอบแบบละเอียดของชีวมวลประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน ซึ่งปริมาณ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน วิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer (FLASH 2000, ThermoScientific, Italy) ส่วนปริมาณกำมะถันวิเคราะห์ได้ตามมาตรฐาน ASTM D4239 Standard Test Method For Sulfur In The Analysis Sample Of Coal And Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion แต่จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่กำมะถันเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณน้อยมากในชีวมวล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำองค์ประกอบดังกล่าวมาประกอบการพิจารณา และปริมาณออกซิเจนนั้นวิเคราะห์ได้

จากการคำนวณผลต่างดังสมการที่ (3) [27] ซึ่งในการวิเคราะห์ได้ทำซ้ำ 3 ครั้ง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งแสดงค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%, dry basis)

$$100 = C + H + N + O \quad (3)$$

อัตราส่วนโมลาร์ของ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ของชีวมวลดิบและชีวมวลทอรัฟไฟด์ คำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ [28]

$$\text{Molar element ratio of } \frac{O}{C} = \frac{\left(\frac{\text{weight percent oxygen}}{\text{atomic weight oxygen}} \right)}{\left(\frac{\text{weight percent carbon}}{\text{atomic weight carbon}} \right)} \quad (4)$$

$$\text{Molar element ratio of } \frac{H}{C} = \frac{\left(\frac{\text{weight percent hydrogen}}{\text{atomic weight hydrogen}} \right)}{\left(\frac{\text{weight percent carbon}}{\text{atomic weight carbon}} \right)} \quad (5)$$

เมื่อ C, H และ O คือ ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%) ของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน

ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value: LHV) และค่าความร้อนสูง (Higher heating value: HHV) ของชีวมวลดิบและชีวมวลทอรัฟไฟด์คำนวณจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด ดังสมการที่ (6) และ (7) [29]

$$LHV = -5.2454 + 0.2489N + 0.4340C + 0.2243H + 0.00162O \quad (6)$$

$$HHV = -4.6246 + 0.2732N + 0.4120C + 0.5992H + 0.0184O \quad (7)$$

เมื่อ C, H, N และ O คือ ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%, dry basis) ของ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ของชีวมวลดิบและชีวมวลทอรัฟไฟด์

2.5.3 ผลได้พลังงานและความหนาแน่นพลังงาน

ผลได้พลังงาน (Energy yield: EY) และความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification: ED) คำนวณได้จากสมการที่ (8) และสมการที่ (9) [30] ตามลำดับ

$$EY(\%) = \text{Mass yield}(\%) \times \frac{HHV_{tor}}{HHV_{raw}} \quad (8)$$

$$ED(\%) = \frac{HHV_{tor} - HHV_{raw}}{HHV_{raw}} \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ HHV คือค่าความร้อนสูงของชีวมวล (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) และ ตัวย่อ ' raw ' และ ' tor ' คือชีวมวลดิบและชีวมวลทอรัฟไฟด์ ตามลำดับ

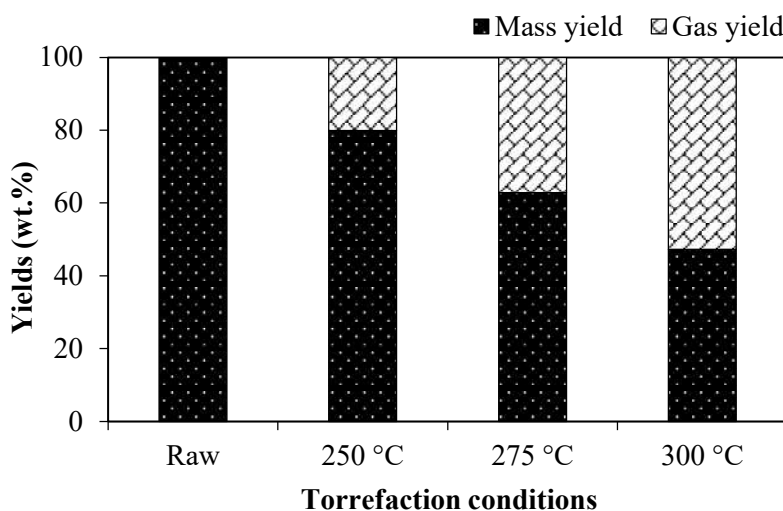
2.5.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวล

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ในชีวมวลดิบและชีวมวลทอรัฟไฟด์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR) (ThermoScientific, Nicolet 6700, USA) โดยสแกนด้วยคลื่นอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น (Wave number) 4,000 ถึง 400 ต่อเซนติเมตร เนื่องจากครอบคลุมช่วงการดูดกลืนรังสีของสารอินทรีย์ในชีวมวล

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลได้ผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรัฟไฟด์ชันประกอบด้วยผลิตภัณฑ์หลักซึ่งเป็น ของแข็ง (Mass yield) และผลิตภัณฑ์ส่วนที่เหลืออยู่ในสถานะก๊าซ (Gas yield) ผลการทดลองปรากฏดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลได้ผลิตภัณฑ์ของชีวมวลข้าวโพดภายหลังการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอรัฟไฟด์ชัน

จากการทอรัฟไฟด์ชีวมวลข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นของแข็งร้อยละ 79.98 ± 0.18 , 62.93 ± 0.11 และ 47.40 ± 0.21 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Jaya Shankar Tumuluru [27] ที่ทำการทอรัฟไฟด์ต้นข้าวโพดที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า

ผลได้ผลิตภัณฑ์ร้อยละ 57.37 พบว่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส หากทำการทอรีไฟด์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส จะพบแนวโน้มการลดลงของผลได้ผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ดังเช่นงานวิจัยของ Xianjun Xing และคณะ [31] ที่ทำการทอรีไฟด์ลำต้นข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือร้อยละ 35.46 ส่วนผลได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซมีค่าร้อยละ 20.03 ± 0.18 , 37.08 ± 0.11 และ 52.60 ± 0.21 ตามลำดับ การลดลงของผลได้ผลิตภัณฑ์หลักเกิดจากการสูญเสียความชื้นและสารระเหยเนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และอื่นๆ [32] ความแตกต่างขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของชีวมวล เช่น ชีวมวลประเภทไม้ และมิใช่ไม้ อีกทั้งขึ้นอยู่กับส่วนของชีวมวล เช่น ใบ ลำต้น เปลือก เป็นต้น ชีวมวลจากข้าวโพดเป็นชีวมวลในกลุ่มที่มีมิใช่ไม้นั้นเมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนจะเกิดการสลายตัวได้ง่ายกว่าชีวมวลประเภทที่เป็นไม้ เนื่องจากมีลิกนินเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ต่ำกว่า [33] การสลายตัวเนื่องจากความร้อนนอกจากส่งผลให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ลดลงแล้วยังส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ซึ่งเปลี่ยนไปจาก สีน้ำตาลอ่อน ไปเป็นสีน้ำตาล สีน้ำตาลเข้มและสีดำที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน รูปที่ 3

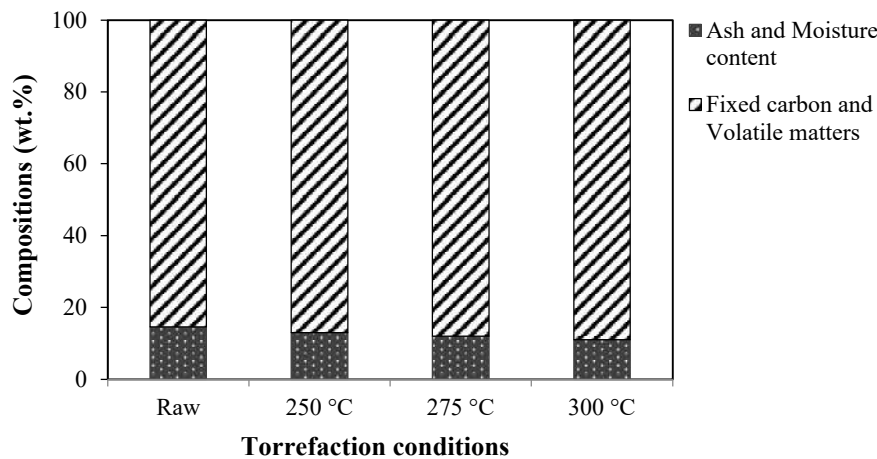


รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลข้าวโพดภายหลังการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส

3.2 ปริมาณเถ้าและความชื้น

ชีวมวลที่ถูกเลือกใช้เป็นเชื้อเพลิงประกอบด้วยส่วนที่เผาไหม้ได้ ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และสารระเหย (Volatile matter) และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ นั่นคือ ความชื้น (Moisture content) และเถ้า (Ash content) [34] ในการศึกษานี้ได้ทดสอบหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างและเถ้า ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ชีวมวลดิบมีค่าความชื้นร้อยละ 7.30 ± 0.25 และเถ้าร้อยละ 7.25 ± 0.56 เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรีไฟแฟชันเพิ่มขึ้น จาก 250 เป็น 275 และ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณความชื้นมีค่าลดลงเป็น ร้อยละ 2.34 ± 0.14 , 1.85 ± 0.22 และ 1.66 ± 0.34 ในขณะที่ปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นในปริมาณร้อยละ 8.38 ± 0.04 , 11.27 ± 0.12 และ 15.26 ± 0.23 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชีวมวลดิบ ความชื้นที่ลดลงส่งผลให้องค์ประกอบในกลุ่มที่เผาไหม้ได้มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4

จากการศึกษาของ Wannapeera และคณะ [35] พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีรีไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความชื้นมีค่าลดลงอีกทั้งส่งผลให้ปริมาณถ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของความชื้นส่งผลดีต่อการเผาไหม้ขณะใช้งานคือ ทำให้เกิดควันในปริมาณน้อย ช่วยลดการเกิดมลพิษจากการเผาไหม้ [36–38]



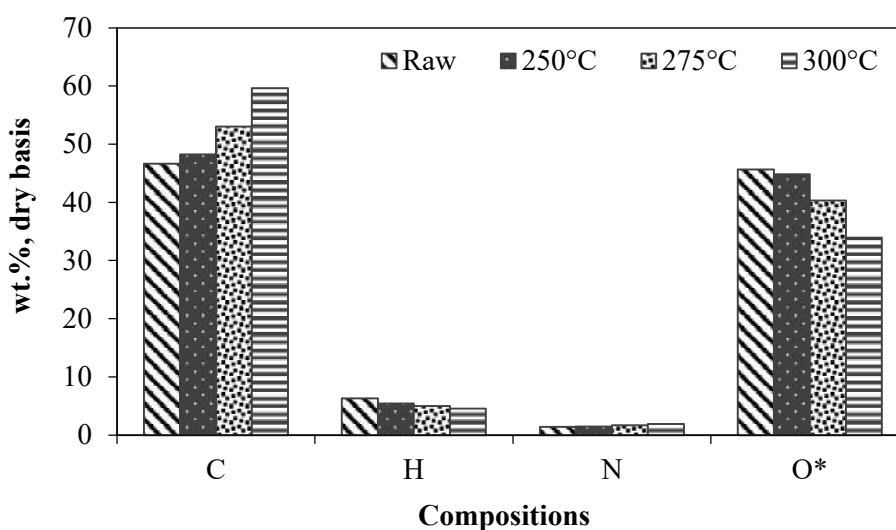
รูปที่ 4 ร้อยละองค์ประกอบส่วนที่เผาไหม้ได้และส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ของชีวมวลข้าวโพดภายหลังการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกชัน

3.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด

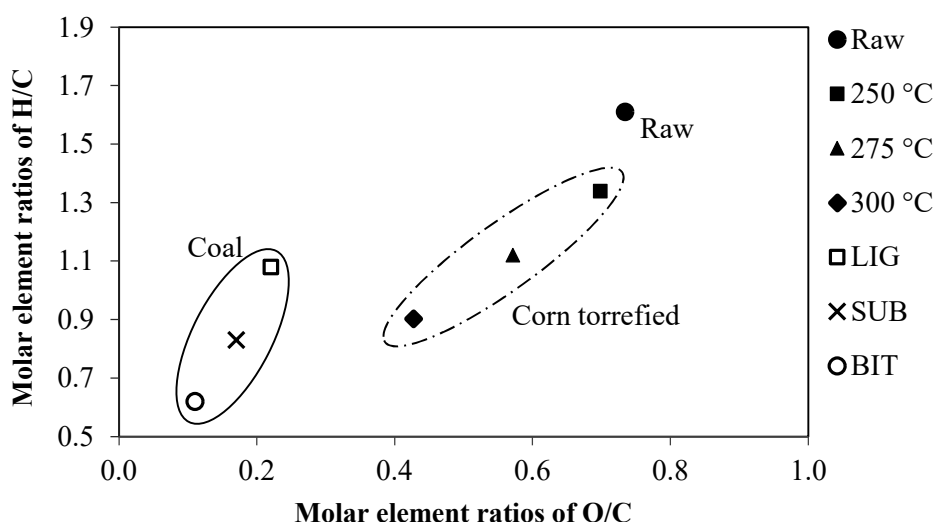
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดของชีวมวลข้าวโพดดิบและชีวมวลข้าวโพดทอรีรีไฟด์แสดงดังรูปที่ 5 พบว่ามีองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอนและออกซิเจน ซึ่งชีวมวลข้าวโพดดิบมีปริมาณออกซิเจนร้อยละ 45.64 ± 0.08 เมื่อทอรีรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 44.86 ± 0.02 , 40.32 ± 0.02 และ 33.95 ± 0.11 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 39.67 ± 1.13 ซึ่งเป็นผลการปรับปรุงเปลือกลำต้นข้าวโพด (Corn stalk shell) ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสในงานวิจัยของ Dorde Medic และคณะ [39] การลดลงของออกซิเจนส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดนั่นคือ ชีวมวลข้าวโพดดิบมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 46.67 ± 0.05 เมื่อทอรีรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ $48.25.80 \pm 0.02$, 53.01 ± 0.05 และ 59.65 ± 0.09 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Jaya Shankar Tumuluru [27] ที่ทำการทอรีรีไฟด์ต้นข้าวโพดที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 54.92 พบว่าสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนในงานวิจัยนี้ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dorde Medic และคณะ [39] ที่ทำการทอรีรีไฟด์เปลือกของลำต้นข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสแล้วพบว่ามีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 53.97 เมื่อสังเกตปริมาณไฮโดรเจนและไนโตรเจนในรูปที่ 5 พบแนวโน้มการลดลงของปริมาณไฮโดรเจนและการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนแต่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยแม้ได้รับการปรับปรุงด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจาก

ปริมาณไฮโดรเจนและไนโตรเจนของชีวมวลดิบรวมกันพบว่ามีค่าน้อยมากเพียงร้อยละ 8 เมื่อเทียบกับองค์ประกอบหลักอื่นๆ

นอกจากนี้การลดลงของออกซิเจนและการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการทอรรีแฟกชันมีค่าสูงขึ้น ส่งผลทำอัตราส่วนโมลาร์ระหว่างอะตอมของออกซิเจนต่ออะตอมของคาร์บอน (O/C) และอะตอมของไฮโดรเจนต่ออะตอมของคาร์บอน (H/C) มีค่าลดลงใกล้เคียงถ่านหิน ทำให้ศักยภาพของชีวมวลข้าวโพดทอรรีไฟด์มีสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงใกล้เคียงถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ (Lignite: LIG) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous: SUB) หรือ บิทูมินัส (Bituminous: BIT) ดังแสดงในรูปที่ 6



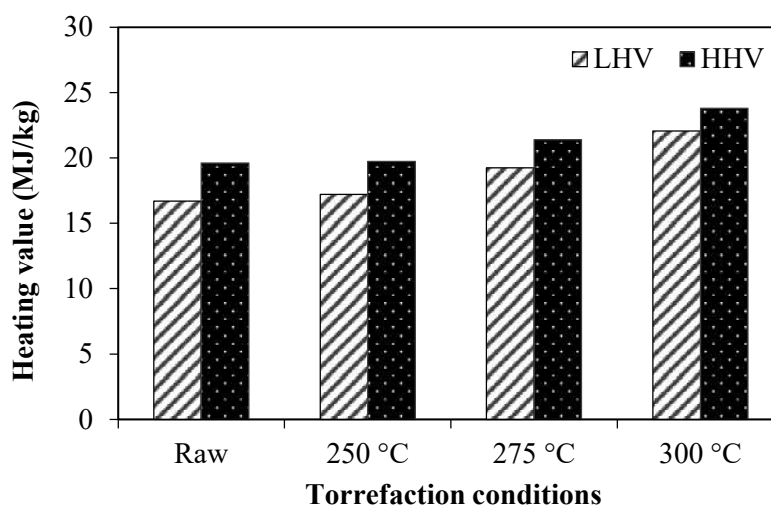
รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบธาตุของชีวมวลข้าวโพดดิบและภายหลังการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน



รูปที่ 6 แผนภาพ Van Krevelen ของชีวมวลข้าวโพดดิบและภายหลังการปรับปรุงเทียบกับถ่านหิน [40]

3.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน

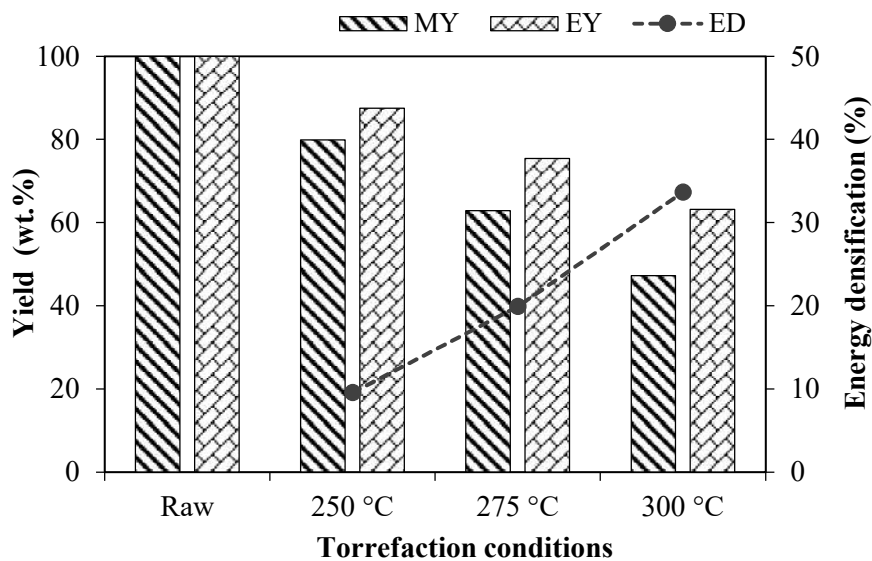
งานวิจัยนี้ใช้การประมาณค่าความร้อนจากสมการเอมพิริคัล (Empirical) ของ Ayse O และคณะ [29] ผลการคำนวณค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของชีวมวลดิบและภายหลังปรับปรุงคุณภาพแสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งพบว่าค่าความร้อนสูงของชีวมวลดิบมีค่าเป็น 19.60 ± 0.00 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อทำการทอรัรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 19.73 ± 0.04 , 21.40 ± 0.06 และ 23.80 ± 0.05 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความร้อนที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaya Shankar Tumuluru [25] ซึ่งทำการทอรัรีไฟด์ต้นข้าวโพดที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความร้อนสูงเป็น 21.51 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม สำหรับค่าความร้อนต่ำของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 17.20 ± 0.02 , 19.23 ± 0.04 และ 22.07 ± 0.04 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนของชีวมวลข้าวโพดทอรัรีไฟด์เกิดจากปริมาณความชื้นลดลง ปริมาณออกซิเจนลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น [41]



รูปที่ 7 ค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของชีวมวลข้าวโพดดิบและภายหลังการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอรัรีแฟกชัน

3.5 ผลได้ผลิตภัณฑ์ ผลได้พลังงานและความหนาแน่นพลังงาน

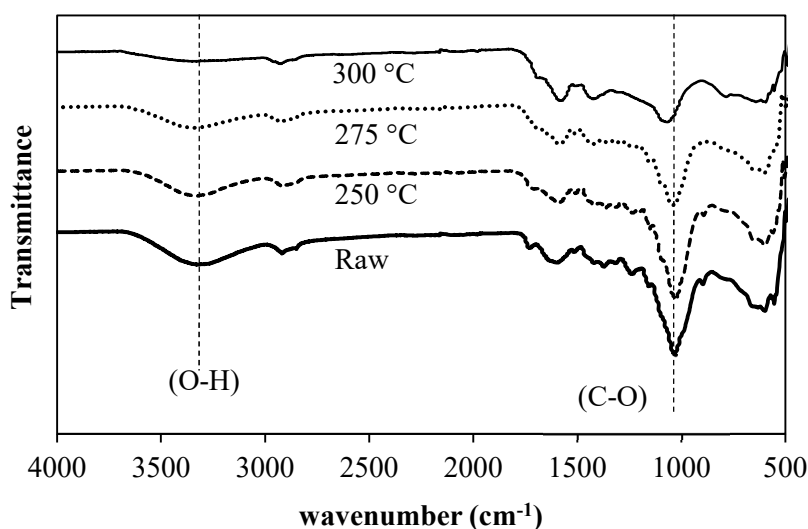
อุณหภูมิที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพด้านเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการทอรัรีแฟกชันนั้น นอกจากจะส่งผลต่อการลดลงของผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่เป็นของแข็ง (Mass yield: MY) แล้ว ยังส่งผลต่อการลดลงของผลได้พลังงานของผลิตภัณฑ์ (Energy yield: EY) อีกด้วย แต่อย่างไรก็ดีการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนส่งผลให้ความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification: ED) มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดที่ได้เสนอไว้ก่อนหน้านี้ และผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ Cardona และคณะ [30] Phanphanich and Mani [25] และ Xin [42]



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลได้ผลิตภัณฑ์ ผลได้พลังงานและความหนาแน่นพลังงาน

3.6 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวล

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวลที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 9 พบว่า ยอดกราฟของหมู่ (O—H) และ (C—O) ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 3000-3500 ต่อเซนติเมตร และ 1033 ต่อเซนติเมตร เริ่มลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงขึ้นเป็น 250, 275 องศาเซลเซียส และลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส การลดลงของหมู่ (O—H) เกิดขึ้นเนื่องจากความชื้นภายในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดความชื้นกลับมีค่าต่ำลง [42] ซึ่งช่วยลดการสลายตัวทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ได้ [24]



รูปที่ 9 สเปกตรัมของชีวมวลข้าวโพดดิบและภายหลังการปรับปรุงด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน

ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับ Xin และคณะ [39] และการศึกษาของ Rousset และคณะ [43] ส่วนการลดลงของหมู่ฟังก์ชัน (C=O) เกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่เหลือ (C-H) (C=O) และ (C=C) ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 2800-3000, 1600-1740 และ 1505-1600 ต่อเซนติเมตร [44] มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4. สรุป

การปรับปรุงสมบัติทางเคมีความร้อนของชีวมวลข้าวโพดด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชันสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติด้านเชื้อเพลิงมีคุณภาพดีขึ้น พิจารณาได้จากปริมาณความชื้นลดลงส่งผลให้องค์ประกอบในกลุ่มที่เผาไหม้ได้มีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ที่แสดงให้เห็นว่ามีการลดลงของหมู่ (O-H) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสัมพันธ์กับผลวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนที่มีค่าลดลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอนมีค่าสูงขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวส่งผลให้อัตราส่วน ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลงซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าชีวมวลข้าวโพดที่ผ่านการทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีศักยภาพใกล้เคียงถ่านหิน นอกจากนี้การลดลงของความชื้นและออกซิเจนรวมทั้งการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนส่งผลให้ค่าความร้อนสูงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนส่งผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นด้วยสมบัติของชีวมวลข้าวโพดทอรรีไฟด์จึงเหมาะสมจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง หรือเชื้อเพลิงร่วม (Co-firing) ในหม้อไอน้ำ (Boiler) และช่วยลดมลภาวะทางอากาศจากการเผาไหม้ชีวมวลข้าวโพดได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นจากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทอรรีแฟกชันช่วยปรับปรุงคุณภาพการเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้กับชีวมวลข้าวโพดได้ โดยการทอรรีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สมบัติด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลมีค่าดีที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลได้ผลิตภัณฑ์พบว่าปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาเพิ่มเติมด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] แผนปฏิบัติการป้องกันและแก้ไขปัญหไฟป่า การเผาในที่โล่งและมลพิษหมอกควัน พ.ศ. 2556 – 2562 [Online], Available: <http://www.aepd.doae.go.th/wp-content/uploads/2014/02/Forest-fires-and-haze.pdf> [5 กรกฎาคม 2563].
- [2] แผนปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระแห่งชาติ การแก้ไขปัญหามลพิษด้านฝุ่นละออง [Online], Available: <https://www.pcd.go.th/strategy/แผนปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระแห่งชาติ-การแก้ไขปัญหามลพิษด้านฝุ่นละออง/> [7 ตุลาคม 2563].

- [3] Executive Summary Report Developing of biomass database potential in Thailand [Online], Available: <http://weben.dede.go.th/webmax/content/biomass-database-potential-thailand> [15 กันยายน 2563].
- [4] ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [Online], Available: <http://www.oae.go.th/view/1/ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร/TH-TH> [29 มิถุนายน 2563].
- [5] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, “โครงการศึกษาแนวทางบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงและลดการเกิดหมอกควัน,” รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์, 2555.
- [6] แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรุงเทพฯ, 2559, หน้า 1-9 [Online], Available: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb/aedp> [25 มิถุนายน 2563].
- [7] แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 (PDP2018) [Online], Available: <http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/PDP2018.pdf> [17 สิงหาคม 2563].
- [8] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” Bioresource Technology, Vol. 83, 2002, pp. 37–46.
- [9] A. Pimchuai, A. Dutta and P. Basu, “Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties,” Energy Fuels, Vol. 24, 2010, pp. 4638–4645.
- [10] M.J.C. van der Stelt, H. Gerhauser, J.H.A. Kiel and K.J. Ptasinski, “Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review,” Biomass and Bioenergy, Vol. 35, 2011, pp. 3748–3762.
- [11] M. Wilk, A. Magdziarz and I. Kalembe, “Characterisation of renewable fuels’ torrefaction process with different instrumental techniques,” Energy, Vol. 87, 2015, pp. 259–269.
- [12] R. Tu, E. Jiang, S. Yan, X. Xu and S. Rao, “The pelletization and combustion properties of torrefied Camellia shell via dry and hydrothermal torrefaction: A comparative evaluation,” Bioresource Technology, Vol. 264, 2018, pp. 78–89.
- [13] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 2): conversion technologies,” Bioresource Technology, Vol. 83, 2002, pp. 47–54.
- [14] W.H. Chen et al., “Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges,” Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 82, 2021, pp. 100887.
- [15] O. Onay and O.M. Kockar, “Slow, fast and flash pyrolysis of rapeseed,” Renewable Energy, Vol. 28, 2003, pp. 2417–2433.

- [16] J.M.C. Ribeiro, R. Godina, J.C. de O. Matias and L.J.R. Nunes, “Future Perspectives of Biomass Torrefaction: Review of the Current State-Of-The-Art and Research Development,” *Sustainability*, Vol. 10, 2018, pp. 1–17.
- [17] J. Shankar Tumuluru, S. Sokhansanj, J.R. Hess, C.T. Wright and R.D. Boardman, “REVIEW: A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications,” *Industrial Biotechnology*, Vol. 7, 2011, pp. 384–401.
- [18] IEA Bioenergy, Status overview of torrefaction technologies [Online] , Available: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/status-overview-of-torrefaction-technologies-a-review-of-the-commercialisation-status-of-biomass-torrefaction/> [July 27, 2021].
- [19] M.J. Prins, K.J. Ptasinski and F.J.J.G. Janssen, “Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 77, 2006, pp. 35–40.
- [20] D. Zhang, F. Wang, A. Zhang, W. Yi, Z. Li and X. Shen, “Effect of pretreatment on chemical characteristic and thermal degradation behavior of corn stalk digestate: Comparison of dry and wet torrefaction,” *Bioresource Technology*, Vol. 275, 2019, pp. 239–246.
- [21] D. Medic, M. Darr, A. Shah, B. Potter and J. Zimmerman, “Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading,” *Fuel*, Vol. 91, 2012, pp. 147–154.
- [22] M.-F. Li, X. Li, J. Bian, C.-Z. Chen, Y.-T. Yu and R.-C. Sun, “Effect of temperature and holding time on bamboo torrefaction,” *Biomass and Bioenergy*, Vol. 83, 2015, pp. 366–372.
- [23] E. Barta-Rajnai, L. Wang, Z. Sebestyen, Zs. Barta, R. Khalil, O. Skreiberg, M. Gronli, E. Jakab and Z. Czegeny, “Effect of Temperature and Duration of Torrefaction on the Thermal Behavior of Stem Wood, Bark, and Stump of Spruce,” *Energy Procedia*, Vol. 105, 2017, pp. 551–556.
- [24] J.S. Tumuluru, C.T. Wright and S. Sokhansanj, Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development [Online] , Available: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc837784/> [July 27, 2021].
- [25] M. Phanphanich and S. Mani, “Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass,” *Bioresource Technology*, Vol. 102, 2011, pp. 1246–1253.
- [26] S. Matali, N.A. Rahman, S.S. Idris, N. Yaacob and A.B. Alias, “Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction,” *Procedia Engineering*, Vol. 148, 2016, pp. 671–678.
- [27] J.S. Tumuluru, “Comparison of Chemical Composition and Energy Property of Torrefied Switchgrass and Corn Stover,” *Frontiers in Energy Research*, Vol. 3, 2015, pp. 46.

- [28] J. S. Tumuluru, “ Effect of Deep Drying and Torrefaction Temperature on Proximate, Ultimate Composition, and Heating Value of 2-mm Lodgepole Pine (*Pinus contorta*) Grind,” *Bioengineering*, Vol. 3, No. 2, 2016, pp. 16.
- [29] A. Ozyuguran, A. Akturk and S. Yaman, “Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass,” *Fuel*, Vol. 214, 2018, pp. 640–646.
- [30] S. Cardona, L.J. Gallego, V. Valencia, E. Martínez and L.A. Rios, “ Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 31, 2019, pp. 17–24.
- [31] X. Xing, F. Fan and W. Jiang, “Characteristics of biochar pellets from corn straw under different pyrolysis temperatures,” *Royal Society Open Science*, Vol. 5, 2018, pp. 1–10.
- [32] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, Academic Press, 2010.
- [33] S. Rangabhashiyam and P. Balasubramanian, “ The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: Performance, mechanism and wastewater application—A review,” *Industrial Crops and Products*, Vol. 128, 2019, pp. 405–423.
- [34] J. Legemza, M. Fröhlichová and R. Findorák, *Biomass and Carbon Fuels in Metallurgy*, 1st edition, CRC Press, 2019.
- [35] J. Wannapeera, B. Fungtammasan and N. Worasuwannarak, “ Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 92, 2011, pp. 99–105.
- [36] E. Bilgic, S. Yaman, H. Haykiri-Acma and S. Kucukbayrak, “Limits of variations on the structure and the fuel characteristics of sunflower seed shell through torrefaction,” *Fuel Processing Technology*, Vol. 144, 2016, pp. 197–202.
- [37] R.K. Singh, J.P. Chakraborty and A. Sarkar, “Optimizing the torrefaction of pigeon pea stalk (*cajanus cajan*) using response surface methodology (RSM) and characterization of solid, liquid and gaseous products,” *Renewable Energy*, Vol. 155, 2020, pp. 677–690.
- [38] K.-T. Wu, C.-J. Tsai, C.-S. Chen and H.-W. Chen, “The characteristics of torrefied microalgae,” *Applied Energy*, Vol. 100, 2012, pp. 52–57.
- [39] D. Medic, M. Darr, A. Shah and S. Rahn, “The Effects of Particle Size, Different Corn Stover Components, and Gas Residence Time on Torrefaction of Corn Stover,” *Energies*, Vol. 5, 2012, pp. 1199–1214.

- [40] A. Odeha, S. Ogbeideb and C. Okieimenc, “Elucidation of the Influence of Coal Properties on Coal-Char Reactivity: A Look at Southern Hemisphere Coals,” *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, Vol. 9, 2017, pp. 1–7.
- [41] M.N. Cahyanti, T.R.K.C. Doddapaneni, M. Madissoo, L. Pärn, I. Virro and T. Kikas, “Torrefaction of Agricultural and Wood Waste: Comparative Analysis of Selected Fuel Characteristics,” *Energies*, Vol. 14, 2021, pp. 2774.
- [42] S. Xin, T. Mi, X. Liu and F. Huang, “Effect of torrefaction on the pyrolysis characteristics of high moisture herbaceous residues,” *Energy*, Vol. 152, 2018, pp. 586–593.
- [43] P. Rousset, C. Aguiar, N. Labbé and J.-M. Commandré, “Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction,” *Bioresource Technology*, Vol. 102, 2011, pp. 8225–8231.
- [44] S.A. Pushkin, L.V. Kozlova, A.A. Makarov, A.N. Grachev and T.A. Gorshkova, “Cell wall components in torrefied softwood and hardwood samples,” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 116, 2015, pp. 102–113.