

สหสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการประเมินค่าความร้อนสูงด้วยค่าการวิเคราะห์
โดยประมาณของชีวมวลและถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้และซังข้าวโพด
Proximate Analysis Based Higher Heating Value Correlation of
Biomass and Biochar from Cacao Husk and Corncob

นงนุช ศรีเล็ก¹, ปรานต์ เมฆอากาศ², วิภาวรรณ นันโท³, พรหทัย พุทธิวัน⁴ และสิทธิฤกษ์ เหล็กพูล^{5*}

Nongnoot Srilek¹, Pran Makarkard², Wipawan Nunto³, Pornhathai Putthawan⁴

and Sitthikrit Leckpool^{5*}

^{1,2,5*}คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

^{3,4} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย 80 ถนนพหลโยธิน อ.เมืองเชียงราย จ.เชียงราย 57100

โทรศัพท์ 08 3573 1028 โทรสาร 0 5377 6015 อีเมล : sitthikrit.lec@crru.ac.th

^{1,2,5*} Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University,

^{3,4} Faculty of Science and Technology, Chiang Rai Rajabhat University

80 Phaholyotin Rd. Muang Chiang Rai, Thailand, 57100, Tel. +668 3573 1028, Fax. +66 5377 6015,

E-mail: sitthikrit.lec@crru.ac.th

วันที่รับบทความ 28 ธันวาคม 2564

Received: Dec. 28, 2021

วันที่รับแก้ไขบทความ 22 มิถุนายน 2565

Revised: Jun. 22, 2022

วันที่ตอบรับบทความ 22 มิถุนายน 2565

Accepted: Jun. 22, 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลการคัดเลือกสหสัมพันธ์ที่เหมาะสม สำหรับการทำนายค่าความร้อนสูงโดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบ โดยประมาณของชีวมวลสองชนิดซึ่งเป็นชีวมวลคงเหลือจากพืชเศรษฐกิจในพื้นที่จังหวัดเชียงราย ได้แก่ เปลือกโกโก้และซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพจากชีวมวลทั้งสองซึ่งผลิตจากกระบวนการทอริแฟกชัน โดยใช้สหสัมพันธ์สองกลุ่ม คือ สหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยประมาณและสหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุจำนวน 31 สหสัมพันธ์มาคำนวณเปรียบเทียบกับชีวมวลและถ่านชีวภาพตัวอย่าง โดยพบว่า สหสัมพันธ์ในกลุ่มสหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ PC15 มีความแม่นยำสูงสุดที่ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAE = 4.69% จึงเป็นสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวล และถ่านชีวภาพจากชีวมวลที่ทำการศึกษาตามเกณฑ์การคัดเลือกที่ได้นำเสนอไว้

คำสำคัญ: สหสัมพันธ์ค่าความร้อนสูง, เปลือกโกโก้, ซังข้าวโพด, ถ่านชีวภาพ

Abstract

This research article presents a selection routine for the higher heating value prediction correlations based on the proximate composition data. Thirty-one correlations from two different types - proximate analysis-based correlations and ultimate analysis - based correlations - were computed and validated against the experimental data from two Chiang Rai regional crop residue biomasses, including cacao husk and corncob, as well as their torrefied biochar. The result showed that the correlation PC15 was the most accurate in our study with the mean absolute error MAE = 4.69%.

Keywords: Higher heating value correlations, Cacao husk, Corncob, Biochar

1. บทนำ

แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2561 - 2580 (Alternative energy development plan : AEDP2018) กำหนดเป้าหมายใน พ.ศ.2580 ให้มีการผลิตพลังงานความร้อนจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนคงเหลือประเภทชีวมวล ปริมาณ 23,000 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบหรือร้อยละ 35.60 ของพลังงานความร้อนที่ต้องการทั้งหมด ในจังหวัดทางภาคเหนือมีผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและกลุ่มเกษตรกรทางการเกษตรหลายชนิด ได้แก่ ข้าว โกโก้ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มันสำปะหลัง อ้อย ลำไย ปาล์ม ฟางข้าว เป็นต้น ชีวมวลเหลือทิ้งจากผลผลิตเหล่านี้มีศักยภาพด้านปริมาณ จากข้อมูลของคณะทำงานพัฒนาคุณภาพข้อมูลด้านพืช ภาคเหนือ พ.ศ.2560 พบว่า จังหวัดเชียงรายมีผลผลิตข้าวโพด 263,293 ตัน (ปีเพาะปลูก พ.ศ.2558/2559) โดยมีแหล่งสำคัญ ได้แก่ อำเภอแม่สรวย เวียงป่าเป้า เทิง และ เวียงแก่น ตามลำดับ จะมีซึ่งข้าวโพดเกิดขึ้น ร้อยละ 19 ของปริมาณข้าวโพดที่เก็บเกี่ยว คิดเป็น 50,025 ตัน นอกจากนี้ ในอำเภอแม่จันมีกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกโกโก้เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จากโกโก้เชิงพาณิชย์ โดยเกิดวัสดุเหลือทิ้งเปลือกโกโก้เป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่แล้วชีวมวล (Biomass) มีค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) ประมาณ 16-19 MJ/kg (Wilson, Yang, Blasiak, John, & Mhilu, 2011) จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความร้อน ซึ่งกระบวนการทอริแฟกชัน (Torrefaction) เป็นการเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) รูปแบบหนึ่ง เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของชีวมวล ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนให้มีปริมาณของคาร์บอนเพิ่มขึ้นและลดปริมาณของออกซิเจนให้ต่ำลง โดยทั่วไปมีอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 200 - 300 °C (Basu, 2013, 13) ทำให้ได้ถ่านชีวภาพ (Biochar) ที่มีศักยภาพด้านความร้อนเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บและขนส่ง

จากการวิจัยพบว่ามีการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรกันอย่างแพร่หลาย เช่น ซึ่งข้าวโพด (Onsree & Tippayawong, 2020) ฟางข้าว (Kaewpengkrow (Rittichote) et al, 2020, pp. 27 - 35) ทูเรียน (Saueprasearsit et al, 2020, pp. 580 - 586) เป็นต้น ถ่านชีวภาพที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV), องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate composition) ได้แก่ ร้อยละโดยมวล/มวล (%wt) ของความชื้น (Moisture, M), สารระเหยได้ (Volatile mater, VM),

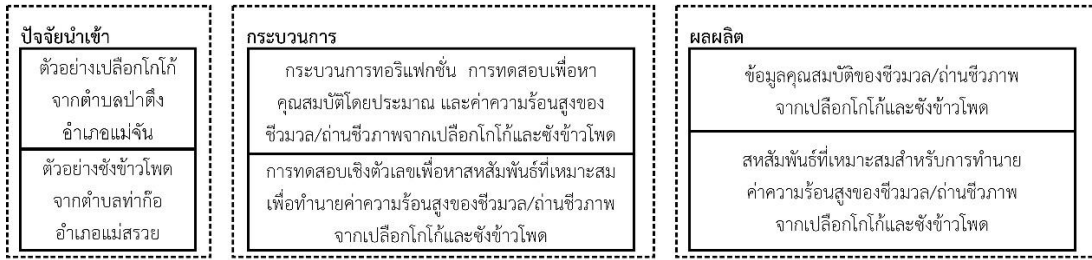
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) และเถ้า (Ash, ASH) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Elemental composition) ซึ่งแสดงเป็นปริมาณร้อยละของโดยมวล/มวล ของคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) คุณสมบัติเหล่านี้บ่งบอกถึงคุณภาพทางความร้อนของเชื้อเพลิง ซึ่งหากการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลต่างชนิด ด้วยสภาวะที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน มีความจำเป็นต้องทดสอบคุณสมบัติที่จำเป็นเหล่านี้ทุกครั้งที่ไป ในต่างประเทศ มีการศึกษาการทำนายค่าความร้อนสูง โดยใช้สหสัมพันธ์ (Correlation) อย่างกว้างขวาง (Acar & Ayanoglu, 2012; Nhuchhen & Afzal, 2017) สำหรับประเทศไทยนั้น การใช้สหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงจากผลผลิตหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการนำไปประยุกต์ใช้นั้นยังไม่แพร่หลายนัก ประกอบกับการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงนั้นใช้เครื่องมือที่มีค่าใช้จ่ายสูงจากเหตุผลข้างต้น จึงทำให้คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำเสนอการใช้สหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความร้อนสูง นอกเหนือจากการใช้เครื่องมือวิเคราะห์โดยตรง อย่างไรก็ตาม สหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงมีความหลากหลาย การเลือกสหสัมพันธ์ที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้คัดเลือกหาสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับถ่านชีวภาพที่ทำการศึกษา ซึ่งพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error หรือ MAE) ระหว่างค่าจากการวิเคราะห์คุณสมบัติและค่าจากการคำนวณสหสัมพันธ์ โดยใช้ค่าความร้อนสูงที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ศึกษา เปรียบเทียบกับค่าความร้อนสูงที่ได้จากการคำนวณด้วยสหสัมพันธ์ จากบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ จำนวน 31 สหสัมพันธ์ ซึ่ง จำแนกเป็น 2 กลุ่มคือ สหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยประมาณ (Proximate Analysis-Based Correlations) และ สหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis-Based correlations)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อคัดเลือกสหสัมพันธ์ที่เหมาะสม สำหรับการทำนายค่าความร้อนสูงจากถ่านชีวภาพ จากเปลือกโกโก้และซังข้าวโพด

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เป็นการคัดเลือกสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความร้อนสูง โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบโดยประมาณ และค่าความร้อนสูงของชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ เปลือกโกโก้ (Cocoa husk) และซังข้าวโพด (Corn cob) และถ่านชีวภาพจากชีวมวลดังกล่าว โดยเตรียมถ่านชีวภาพ ด้วยกระบวนการทอริแฟกชันและนำไปทดสอบองค์ประกอบโดยประมาณ และค่าความร้อนสูง ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงไว้ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดและกระบวนการดำเนินงานวิจัย

3.1 เตรียมถ่านชีวภาพจากชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ เปลือกโกโก้ จากแหล่งผลิตโกโก้ ตำบลป่าตึง อำเภอแม่จัน และซังข้าวโพด จากตำบลท่าก้อ อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย โดยนำเปลือกโกโก้ จำนวน 15 กิโลกรัม มาผลิตเป็นถ่านชีวภาพด้วยเตาสำหรับทอริแฟกชั่น (Uprakul and Srilek, 2021, pp. 1155 - 1167) โดยอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาเป็น 280 °C ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที (Pukhampuang et al. 2021, pp. 19 - 20) ถ่านชีวภาพที่ได้หลังเสร็จสิ้นกระบวนการ นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณ Solid yield ดำเนินการเช่นเดียวกันโดยใช้ซังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ จากนั้นนำชีวมวลและถ่านชีวภาพที่ได้ไปหาค่าความร้อนสูง โดยใช้เครื่อง Calorimeter (Parr™) 6400 และวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น สารระเหยได้ คาร์บอนคงตัว และเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D7582

3.2 การคัดเลือกสหสัมพันธ์ที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงสำหรับถ่านชีวภาพ จากกระบวนการทอริแฟกชั่นของชีวมวลที่ทำการศึกษา

1) สหสัมพันธ์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นสหสัมพันธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ในวารสารวิชาการและได้ถูกรวบรวมไว้ในบทความวิจัยของ (Nhuchhen & Afzal, 2017) จำนวน 31 สหสัมพันธ์ โดยจำแนกเป็น 2 กลุ่ม คือสหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์ องค์ประกอบโดยประมาณตามตารางที่ 1 และสหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการ วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ตามตารางที่ 2

2) ขั้นตอนการคำนวณค่าความร้อนสูงจากสหพันธ์ การคำนวณดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2 ได้ถูกเขียนด้วยชุดคำสั่งภาษา Python โดยมีค่านำเข้าการคำนวณ คือ ค่าร้อยละโดยมวล/มวล (%wt) ของคาร์บอนคงตัว (FC) และค่าสารระเหยได้ (VM) ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยประมาณจากชีวมวลและถ่านชีวภาพที่ทำการศึกษา สำหรับปริมาณร้อยละโดยมวล/มวลของเถ้า (ASH) สามารถคำนวณได้จาก (Basu, 2013, p.79)

$$ASH = 100 - FC - VM \tag{1}$$

จากนั้นใช้สหสัมพันธ์จากตารางที่ 3 ประมาณค่าองค์ประกอบแบบแยกธาตุจากค่า องค์ประกอบโดยประมาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสหสัมพันธ์เพื่อทำนายองค์ประกอบ แบบแยกธาตุอีกจำนวน 2 สหสัมพันธ์ โดยปริมาณร้อยละโดยมวล/มวล ของไนโตรเจน (N) สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกันกับค่าปริมาณเถ้า (Basu, 2013, p.79) คือ

$$N = 100 - C - H - O \tag{2}$$

โดยที่ C, H, O คือ ปริมาณร้อยละโดยมวล/มวลของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ตามลำดับ
 ค่าองค์ประกอบดังกล่าวมานี้ถูกใช้เป็นค่านำเข้า (Input) สำหรับการคำนวณสหสัมพันธ์
 โดยจำแนกตามประเภทขององค์ประกอบ ดังภาพที่ 2 ทำให้มีรูปแบบการคำนวณรวมทั้งสิ้น
 43 รูปแบบ

ตารางที่ 1 สหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ
 (Proximate Analysis-Based Correlations)

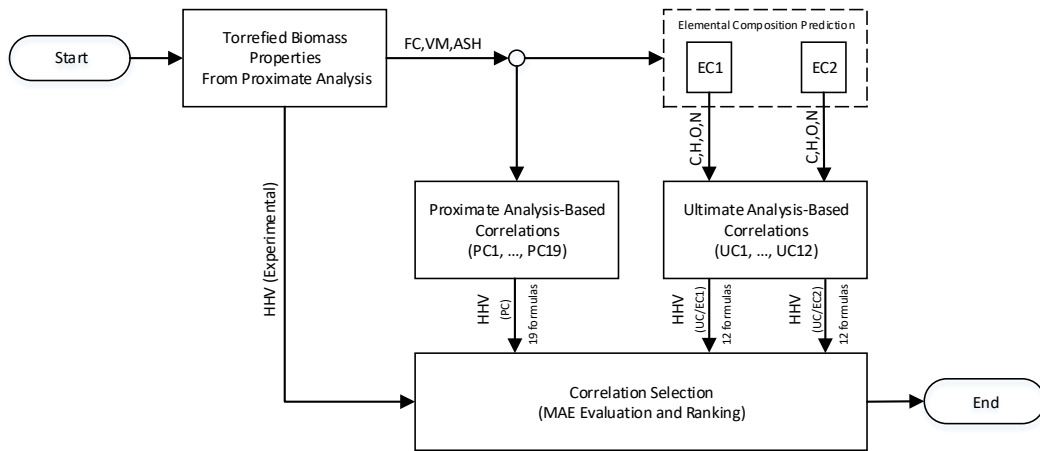
ที่	สหสัมพันธ์ (Correlations)	อ้างอิง
PC1	$HHV = 0.1846VM + 0.3525FC$	Nhuchhen, D. R. et al., 2017
PC2	$HHV = 35.4879 - 0.3023ASH - 0.1905VM$	Soponpongpipat et al., 2015
PC3	$HHV = 19.2880 - 0.2135VM/FC - 1.9584ASH/VM + 0.0234FC/ASH$	Nhuchhen, D. R. et al., 2012
PC4	$HHV = 20.86 - 0.261ASH$	Ferre, A. J. et al., 2011
PC5	$HHV = -13.173 + 0.416VM$	Ferre, A. J. et al., 2011
PC6	$HHV = -2.057 - 0.092ASH + 0.279VM$	Ferre, A. J. et al., 2011
PC7	$HHV = 0.1905VM + 0.2521FC$	Yin, C. Y., 2011
PC8	$HHV = 19.914 - 0.2324ASH$	Sheng, C. et al., 2005
PC9	$HHV = -3.036 + 0.2218VM + 0.2601FC$	Sheng, C. et al., 2005
PC10	$HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078ASH$	Parikh, J. et al., 2005
PC11	$HHV = -0.0066FC^2 + 0.5866FC + 8.752$	Demirbaş, A., 2003
PC12	$HHV = -0.0066VM^2 + 0.7371VM + 1.2305$	Demirbaş, A., 2003
PC13	$HHV = 0.356248VM - 6.998497$	Kathiravale, S. et al., 2003
PC14	$HHV = 0.3543FC + 0.1708VM$	Cordero, T. et al., 2001
PC15	$HHV = 0.196FC + 14.119$	Demirbaş, A., 1997
PC16	$HHV = 0.312FC + 0.1534VM$	Demirbaş, A., 1997
PC17	$HHV = -10.81408 + 0.3133(FC+VM)$	Jiménez, L. et al., 1991
PC18	$HHV = 20.067 - 0.234ASH$	Ebeling, J. M. et al., 1985
PC19	$HHV = 26.601 - 0.304ASH - 0.082VM$	Ebeling, J. M. et al., 1985

ตารางที่ 2 สหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ
 (Ultimate Analysis-Based Correlations)

ที่	สหสัมพันธ์ (Correlations)	อ้างอิง
UC1	$HHV = 32.7934 + 0.0053C^2 - 0.5321C - 2.8769H + 0.0608CH - 0.2401N$	Nhuchhen, D. R. et al., 2017
UC2	$HHV = 0.924C - 22.403$	Ramzy, E. et al., 2013
UC3	$HHV = 0.879C + 0.3214H + 0.056O - 24.826$	Ramzy, E. et al., 2013
UC4	$HHV = -3.147 + 0.468C$	Ferre, A. J. et al., 2011
UC5	$HHV = -1.642 - 0.024ASH + 0.475(C+N) - 0.376(H+N)$	Ferre, A. J. et al., 2011
UC6	$HHV = 23.668 - 7.032H - 0.002ASH^2 + 0.005C^2 + 0.771H^2 + 0.019N^2$	Ferre, A. J. et al., 2011
UC7	$HHV = (3.55C^2 - 232C - 2230H + 51.2CH + 131N + 20600)/1000$	Friedl, A. et al., 2005
UC8	$HHV = -1.3675 + 0.3137C + 0.7009H + 0.0318O$	Sheng, C. et al., 2005
UC9	$HHV = 0.3259C + 3.4597$	Sheng, C. et al., 2005
UC10	$HHV = 0.335C + 1.423H - 0.154O - 0.145N$	Demirbaş, A., 1997
UC11	$HHV = -0.763 + 0.301C + 0.525H + 0.064O$	Ebeling, J. M. et al., 1985
UC12	$HHV = 0.4373C - 1.6701$	Tillman, D.A., 1978

ตารางที่ 3 สหสัมพันธ์สำหรับการทำนายองค์ประกอบแบบแยกธาตุจากองค์ประกอบโดยประมาณ (Elemental composition predicting correlations)

ที่	สหสัมพันธ์ (Correlations)	อ้างอิง
EC1	C = 0.637FC + 0.455VM H = 0.052FC + 0.062VM O = 0.304FC + 0.476VM	Parikh, J. et al., 2007
EC2	C = 0.635FC + 0.460VM - 0.095ASH H = 0.059FC + 0.060VM + 0.010ASH O = 0.340FC + 0.469VM - 0.023ASH	Shen, J. et al., 2010



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงการคำนวณเพื่อคัดเลือกสหสัมพันธ์ทำนายค่าความร้อนสูงสำหรับถ่านชีวภาพจากชีวมวลที่ทำการศึกษา

3) ขั้นตอนการคัดเลือกสหสัมพันธ์ที่เหมาะสม ค่าความร้อนสูงที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์จะถูกนำมาคำนวณหาค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error, RE) เทียบกับค่าความร้อนสูงที่ได้จากการทดสอบถ่านชีวภาพแต่ละชนิด ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก (Nhuchhen & Afzal, 2017)

$$RE_{i,b} = \frac{HHV_{P_{i,b}} - HHV_{E_b}}{HHV_{E_b}} \times 100 \tag{3}$$

โดยที่ $RE_{i,b}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของสหสัมพันธ์ที่ i และถ่านชีวภาพชนิด b ส่วน HHV คือ ค่าความร้อนสูง ในหน่วย MJ/kg และตัวห้อย P, E คือ ค่าทำนายที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สหสัมพันธ์ และค่าที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพ ตามลำดับ จากนั้นจะนำค่า RE ที่คำนวณได้จากชีวมวลแต่ละชนิดด้วยสหสัมพันธ์หนึ่ง มาหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute error, MAE) ของสหสัมพันธ์นั้น โดย (Nhuchhen & Afzal, 2017)

$$MAE_i = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n |RE_{i,b}| \tag{4}$$

โดย n คือ จำนวนชีวมวลที่นำมาใช้ในการคำนวณ ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเรียงลำดับค่า MAE และสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมนั้นจะถูกพิจารณาจากค่า MAE ที่น้อยที่สุด

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการผลิตถ่านชีวภาพและการทดสอบคุณสมบัติโดยประมาณและค่าความร้อนสูง

1) ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลเปลือกโกโก้ ชังข้าวโพด ถ่านชีวภาพเปลือกโกโก้ และถ่านชีวภาพชังข้าวโพด ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 3



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3 ลักษณะกายภาพ (ก) เปลือกโกโก้และถ่านชีวภาพเปลือกโกโก้ (ข) ชังข้าวโพดและถ่านชีวภาพชังข้าวโพด

2) องค์ประกอบโดยประมาณ (ฐานแห้ง) ค่าความร้อนสูง และ Solid yield ของชีวมวลและถ่านชีวภาพ แสดงไว้ดังตารางที่ 4 โดย เปลือกโกโก้ และชังข้าวโพด มีสัดส่วนของสารระเหยได้สูงเป็นร้อยละ 73.6 และ 82.3 ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ใกล้เคียงกัน มีค่าระหว่างร้อยละ 16 - 17 เมื่อผ่านกระบวนการทอริแฟกชันแล้วพบว่า สารระเหยของถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้ และถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพด มีสัดส่วนสารระเหยได้ลดลงและใกล้เคียงกัน มีค่าระหว่างร้อยละ 33 - 37 แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัวในถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดมีค่าสูงมากถึงร้อยละ 63.2 ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มากทำให้ค่าความร้อนสูงสูงตามไปด้วย พบว่า ค่าความร้อนสูงของถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้ และถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพด มีค่าเป็น 23.20 ± 1.22 และ 28.77 ± 1.11 MJ/kg ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว ทำให้ค่าความร้อนสูงเปลี่ยนแปลง

ส่วนปริมาณ Solid yield ของถ่านชีวภาพเปลือกโกโก้และถ่านชีวภาพชังข้าวโพดเป็นร้อยละ 44.0 และ 37.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบโดยประมาณ (ฐานแห้ง) ค่าความร้อนสูง และ Solid yield

ที่	ชีวมวล/ ถ่านชีวภาพ	องค์ประกอบโดยประมาณ (%wt), ฐานแห้ง				ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	Solid yield (%wt)
		M	VM	FC	ASH		
1	เปลือกโกโก้	10.9	73.6	17.1	9.3	16.10 ± 0.04	-
2	ชังข้าวโพด	9.4	82.3	16.2	1.4	17.02 ± 0.05	-
3	ถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้	3.7	37.5	45.4	17.1	23.20 ± 1.22	44.0
4	ถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพด	6.8	33.4	63.2	3.4	28.77 ± 1.11	37.5

4.2 ผลการคำนวณสหสัมพันธ์ทำนายค่าความร้อนสูง สำหรับถ่านชีวภาพจากชีวมวล ที่ทำการศึกษา

1) จากการคำนวณตามขั้นตอนที่ 3.3 ด้วยข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ ของชีวมวลและถ่านชีวภาพตามตารางที่ 4 จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนดังที่แสดงในตารางที่ 5 โดยเรียงลำดับค่า MAE จากน้อยไปมาก และภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ 10 อันดับแรกที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยน้อยที่สุด พบว่าผลการคำนวณจากสหสัมพันธ์ PC15 ให้ค่า MAE น้อยที่สุดจากสหสัมพันธ์ทั้งหมดที่ทำการศึกษา โดยมีค่า MAE เท่ากับร้อยละ 4.69 และมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์จากถ่านชีวภาพแต่ละชนิด $|RE_b| \leq 10\%$

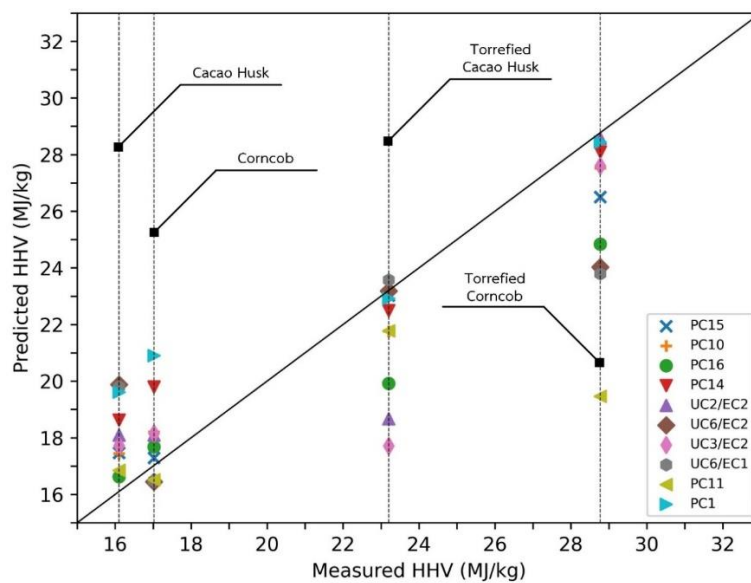
ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ เฉลี่ยจากการคำนวณ สหสัมพันธ์ที่ทำการศึกษาเทียบค่าความร้อนสูง จากการทดสอบชีวมวลและถ่านชีวภาพ

ที่	สหสัมพันธ์	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%)				MAE (%)
		ชีวมวลจากเปลือก โกโก้ (16.10 ± 0.04)	ชีวมวลจาก ขังข้าวโพด (17.02 ± 0.05)	ถ่านชีวภาพจาก เปลือกโกโก้ (23.20 ± 1.22)	ถ่านชีวภาพจากขัง ข้าวโพด (28.77 ± 1.11)	
1	PC15	8.51 (17.471)	1.61 (17.294)	-0.79 (23.017)	-7.87 (26.506)	4.69
2	PC10	8.37 (17.448)	6.96 (18.205)	-6.18 (21.766)	-4.32 (27.528)	6.46
3	PC16	3.26 (16.625)	3.87 (17.679)	-14.15 (19.917)	-13.65 (24.842)	8.73
4	PC14	15.71 (18.629)	16.31 (19.796)	-3.06 (22.490)	-2.34 (28.096)	9.36
5	UC2/EC2	12.40 (18.097)	6.33 (18.098)	-19.51 (18.673)	-0.67 (28.577)	9.73
6	UC6/EC2	23.49 (19.882)	-3.36 (16.449)	-0.06 (23.185)	-16.48 (24.028)	10.85
7	UC3/EC2	10.07 (17.722)	6.66 (18.154)	-23.64 (17.716)	-4.06 (27.601)	11.11
8	UC6/EC1	22.97 (19.798)	-3.12 (16.489)	1.61 (23.572)	-17.30 (23.793)	11.25
9	PC11	4.68 (16.853)	-2.92 (16.523)	-6.12 (21.780)	-32.35 (19.463)	11.52
10	PC1	21.83 (19.614)	22.81 (20.903)	-1.18 (22.926)	-1.13 (28.444)	11.74
11	UC5/EC1	12.73 (18.149)	5.40 (17.939)	-14.75 (19.778)	-20.03 (23.007)	13.23
12	UC4/EC2	7.86 (17.366)	2.04 (17.366)	-23.89 (17.658)	-21.19 (22.674)	13.74
13	UC5/EC2	11.32 (17.923)	-3.81 (16.371)	-18.49 (18.910)	-21.75 (22.512)	13.84
14	UC12/EC2	8.68 (17.497)	2.81 (17.498)	-23.41 (17.770)	-21.94 (22.457)	14.21
15	UC2/EC1	15.56 (18.605)	27.69 (21.733)	-13.43 (20.085)	0.24 (28.838)	14.23
16	UC7/EC2	16.21 (18.709)	7.09 (18.227)	-14.35 (19.871)	-22.50 (22.297)	15.04
17	UC3/EC1	12.98 (18.190)	26.56 (21.541)	-18.66 (18.871)	-4.04 (27.607)	15.56
18	UC9/EC2	10.21 (17.744)	4.26 (17.745)	-22.64 (17.947)	-25.48 (21.441)	15.65
19	UC4/EC1	9.46 (17.623)	12.85 (19.207)	-20.81 (18.373)	-20.73 (22.806)	15.96
20	UC7/EC1	16.94 (18.828)	12.73 (19.187)	-12.34 (20.337)	-21.97 (22.450)	16.00
21	UC1/EC2	-0.90 (15.955)	-1.97 (16.685)	-37.72 (14.448)	-24.06 (21.847)	16.16
22	UC12/EC1	10.17 (17.738)	12.91 (19.218)	-20.53 (18.438)	-21.51 (22.581)	16.28
23	PC3	12.82 (18.165)	0.65 (17.131)	-21.20 (18.281)	-32.53 (19.411)	16.80
24	UC8/EC2	8.85 (17.526)	6.94 (18.201)	-25.91 (17.190)	-26.45 (21.161)	17.04
25	UC9/EC1	11.33 (17.923)	11.79 (19.027)	-20.49 (18.445)	-25.16 (21.533)	17.19

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ เฉลี่ยจากการคำนวณ สหสัมพันธ์ที่ทำการศึกษาเทียบค่าความร้อนสูง จากการทดสอบชีวมวลและถ่านชีวภาพ (ต่อ)

ที่	สหสัมพันธ์	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%)				MAE (%)
		ชีวมวลจากเปลือกโกโก้ (16.10 ± 0.04)	ชีวมวลจากซังข้าวโพด (17.02 ± 0.05)	ถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้ (23.20 ± 1.22)	ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (28.77 ± 1.11)	
26	UC11/EC2	11.15 (17.895)	8.81 (18.519)	-25.07 (17.383)	-26.16 (21.244)	17.80
27	PC7	13.86 (18.332)	16.11 (19.762)	-19.87 (18.589)	-22.50 (22.295)	18.09
28	PC12	22.54 (19.729)	1.00 (17.190)	-15.56 (19.590)	-35.74 (18.487)	18.71
29	UC8/EC1	9.66 (17.656)	12.73 (19.186)	-25.22 (17.348)	-27.35 (20.900)	18.74
30	UC1/EC1	0.99 (16.259)	12.26 (19.106)	-35.75 (14.907)	-26.12 (21.257)	18.78
31	U10/EC1	-6.89 (14.990)	1.95 (17.352)	-36.92 (14.634)	-29.78 (20.203)	18.89
32	UC11/EC1	12.01 (18.033)	14.91 (19.558)	-24.30 (17.563)	-27.05 (20.989)	19.57
33	PC9	10.16 (17.736)	14.17 (19.432)	-26.34 (17.090)	-27.67 (20.810)	19.58
34	U10/EC2	-7.89 (14.830)	-5.38 (16.105)	-37.32 (14.541)	-28.08 (20.692)	19.67
35	PC2	15.87 (18.656)	-64.25 (6.085)	-0.11 (23.175)	-2.34 (28.097)	20.64
36	PC17	9.33 (17.602)	17.78 (20.046)	-34.66 (15.158)	-32.39 (19.451)	23.54
37	PC19	10.18 (17.739)	-64.45 (6.051)	-21.00 (18.328)	-20.65 (22.829)	29.07
38	PC18	11.12 (17.891)	-44.52 (9.443)	-30.75 (16.066)	-33.02 (19.271)	29.85
39	PC8	10.27 (17.753)	-44.99 (9.363)	-31.29 (15.940)	-33.53 (19.124)	30.02
40	PC4	14.49 (18.433)	-47.06 (9.011)	-29.32 (16.397)	-30.58 (19.973)	30.36
41	PC6	9.45 (17.622)	-1.72 (16.728)	-70.55 (6.832)	-75.85 (6.949)	39.39
42	PC13	19.39 (19.221)	31.14 (22.321)	-72.58 (6.361)	-82.97 (4.900)	51.52
43	PC5	8.35 (17.445)	23.76 (21.064)	-89.54 (2.427)	-97.49 (0.721)	54.79

หมายเหตุ ในวงเล็บ คือ ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าความร้อนสูง ของชีวมวลและถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้ และซังข้าวโพดจากการคำนวณด้วยสหสัมพันธ์

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การศึกษาสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความร้อนสูง จากถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้และชังข้าวโพดที่ได้จากการทอริแฟกชั่น พบว่า

1) ถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้และถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดที่ถูกทดสอบในงานวิจัยนี้มีสัดส่วนสารระเหยได้ลดลงและปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านชีวภาพนี้มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลตั้งต้น สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น โดยค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้เป็น 23.20 ± 1.22 MJ/kg สอดคล้องกับการศึกษาการทอริแฟกชั่นของเปลือกโกโก้ซึ่งได้ค่าความร้อน $21.20-23.11$ MJ/kg ที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา $250-300$ °C (Surono U.B. et al., 2020) กรณี ถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดมีค่าความร้อนสูงเป็น 28.77 ± 1.11 MJ/kg สอดคล้องกับการศึกษาการทอริแฟกชั่นของชังข้าวโพดซึ่งได้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพระหว่าง $20.11 - 28.09$ MJ/kg (Tian et al., 2020) และอยู่ในระดับที่เทียบเคียงได้กับถ่านชีวภาพจากงานวิจัยที่ใช้ชีวมวลเห้งน้ำมันสำปะหลัง ซึ่งมีค่าเป็น 25.91 MJ/kg (Homchat, 2021) และถ่านชีวภาพชานอ้อย 28.27 MJ/kg (Kreatananchai, 2013)

2) จากการศึกษาค่าความร้อนสูงที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ทั้ง 31 สหสัมพันธ์ 43 รูปแบบการคำนวณ โดยเปรียบเทียบกับค่าความร้อนสูงจากการทดสอบชีวมวลและถ่านชีวภาพจากวัตถุดิบทั้งสองชนิด พบว่า สหสัมพันธ์ของ Demirbaş, A. (1997) ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มสหสัมพันธ์สำหรับการคำนวณค่าความร้อนสูงจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณ

$$HHV = 0.196FC + 14.119 \quad (PC15)$$

มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAE = 4.69% ซึ่งน้อยที่สุดในกลุ่มสหสัมพันธ์ที่ทำการทดสอบ โดยในภาพรวม พบว่า จากการนำสหสัมพันธ์ค่าความร้อนสูงจำนวน 31 สหสัมพันธ์มาทำการคำนวณเปรียบเทียบกับชีวมวลและถ่านชีวภาพตัวอย่าง ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ที่ได้นั้นแตกต่างกันเป็นช่วงกว้าง (MAE 4.96 – 54.79%) ทั้งนี้เนื่องจาก ความแม่นยำของสหสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลดิบและระเบียบวิธีที่นำมาใช้สร้างสหสัมพันธ์ ดังนั้น การนำสหสัมพันธ์มาใช้ในการทำนายค่าความร้อนสูงจึงควรมีการทดสอบ (Validation) กับตัวอย่างชีวมวลและถ่านชีวภาพจากพื้นที่นั้น ๆ อีกครั้งหนึ่ง

อย่างไรก็ตาม สหสัมพันธ์ (PC15) ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย MAE = 4.69% ซึ่งน้อยที่สุดในกลุ่มสหสัมพันธ์ที่ทำการทดสอบ ดังนั้น จึงเป็นสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลและถ่านชีวภาพจากชีวมวลที่ทำการศึกษิตตามเกณฑ์การคัดเลือกที่ได้นำเสนอไว้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงโดยลดค่าใช้จ่ายการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือที่มีค่าใช้จ่ายสูงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการวิจัย จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

7. เอกสารอ้างอิง

- Aprakul, U., and Srilek, N. (2021). *Biochar and Briquette Biochar Production Technology from Waste Residue Biomass, Case Study of Sanmaka Community Chiang Rai Province*. The 1st CRRU National Conference on Local Development, 1155-1167. (in Thai)
- Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: practical design and theory*. Academic Press, Amsterdam.
- Callejón-Ferre, A. J., Velázquez-Martí, B., López-Martínez, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2011). Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(2), 948-955.
- Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Rodriguez, J. J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel*, 80(11), 1567-1571.
- Demirbaş, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431-434.
- Demirbaş, A. (2003). Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy conversion and management*, 44(9), 1465-1479.
- Ebeling, J. M., & Jenkins, B. M. (1985). Physical and chemical properties of biomass fuels. *Transactions of the ASAE*, 28(3), 898-0902.
- Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy. (2021). *Alternative Energy Development Plan: AEDP2015*. [online], Available: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb/aedp> access on November 29, 2021. (in Thai)
- Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., & Varmuza, K. (2005). Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica chimica acta*, 544(1-2), 191-198.
- Homchat, K. (2013). *Pyrolysis of Cassava Rhizome in metal kiln for charcoal production (Doctoral's thesis)*. Chiang Mai: Chiang Mai University.
- Jiménez, L., & González, F. (1991). Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels. *Fuel*, 70(8), 947-950.
- Kreatananchai, B. (2013). *Parametric and cost analysis of biochar production from agricultural residues by slow pyrolysis process*. (Master's thesis). Chiang Mai: Chiang Mai University.

- Kaewpengkrow (Rittichote), P., Usapein, P., and Sripha, Y. (2020). Increasing Heating value of Biochar using Pyrolysis of Alkaline Pretreated Rice Straw. *The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University*, 8(2), 27-35. (in Thai)
- Kathiravale, S., Yunus, M. N. M., Sopian, K., Samsuddin, A. H., & Rahman, R. A. (2003). Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. *Fuel*, 82(9), 1119-1125.
- Nhuchhen, D. R., & Afzal, M. T. (2017). HHV predicting correlations for torrefied biomass using proximate and ultimate analyses. *Bioengineering*, 4(1), 7.
- Nhuchhen, D. R., & Salam, P. A. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, 99, 55-63.
- Onsree, T., & Tippayawong, N. (2020). Torrefaction of Maize Residue Pellets with Dry Flue Gas. *BioEnergy Research*, 13, 1-11.
- Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487-494.
- _____. (2007). A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86(12-13), 1710-1719.
- Ramzy, E., Shaharin, A., & Bambang, A. (2013). Prediction of heating values of oil palm fronds from ultimate analysis. *Journal of Applied Sciences*, 13(3), 491-496.
- Pukumpuang, W., Prasertsin, T., Wanachewin, O., Putthawan, P., Intakul, N., Srilek, N., and Auaprakul.U., (2021). *Innovative development to increase value of cocoa in Chiang Rai Province*. Research report. National Research Council of Thailand.
- Sauepresearsit, P., Kaewsawing, S., and Thitkrathok, A. (2020). Bio-coal and Green Fuel Production from Durian Peel. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 39(5), 580-586. (in Thai)
- Shen, J., Zhu, S., Liu, X., Zhang, H., & Tan, J. (2010). The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 983-987.
- Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and bioenergy*, 28(5), 499-507.
- Soponpongpiat, N., Sittikul, D., & Sae-Ueng, U. (2015). Higher heating value prediction of torrefaction char produced from non-woody biomass. *Frontiers in Energy*, 9(4), 461-471.

- Surono U.B., S. H., and Rohmat T.A. (2020). Improving Thermochemical and Physical Properties of Cocoa Pod Shell by Torrefaction and its Potential Utilization. *International Energy Journal*, 20(2), 141-154.
- Tian, X., Dai, L., Wang, Y., Zeng, Z., Zhang, S., Jiang, L., . . . Ruan, R. (2020). Influence of torrefaction pretreatment on corncobs: A study on fundamental characteristics, thermal behavior, and kinetic. *Bioresource Technology*, 297, 122490.
- Tillman, D.A. (1978). *Wood as an Energy Source*. Academic Press: New York, NY, USA.
- Wilson, L., Yang, W., Blasiak, W., John, G. R., & Mhilu, C. F. (2011). Thermal characterization of tropical biomass feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 191-198.
- Yin, C. Y. (2011). Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 90(3), 1128-1132.