



การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีรีแฟคชันของทะลายปาล์มเปล่า ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Optimization of Torrefaction of Palm Empty Fruit Bunch Using Response Surface Methodology

โชคชัย เหมือนมาศ^{*}, ปนัดดา อินทร์ดำ และ รวมพร นิคม

Chokchai Mueanmas^{*}, Panadda Indum and Ruamporn Nikhom

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus

Received : 23 May 2019

Revised : 18 December 2019

Accepted : 28 February 2020

บทคัดย่อ

ทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุเศษเหลือจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีศักยภาพในการที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน แต่อย่างไรก็ตามการนำมาใช้งานโดยตรงจะส่งผลเสียเนื่องจากมีสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงต่ำ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์มเปล่าด้วยกระบวนการทอรีรีแฟคชัน โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบประสมกลางของวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ เพื่อวิเคราะห์หาอันตรกิริยาของอุณหภูมิในช่วง 200 - 320°C และเวลาในช่วง 5 - 50 นาทีต่อค่าตอบสนอง ได้แก่ ร้อยละของผลได้ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย ปริมาณเถ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน ผลที่ได้จากการทดลอง จะใช้ในการสร้างสมการกำลังสอง และทำการทวนสอบความถูกต้องของสมการที่ได้ นอกจากนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ โดยผลที่ได้พบว่ามีค่า R^2 สูง ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องกันของข้อมูลที่ได้จากการทำนาย และข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอรีรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 278°C และเวลา 23 นาที จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีร้อยละผลได้เท่ากับ 36.7% โดยปริมาณความชื้น และปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะลดลง 90.2% และ 31.2% ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้น 1,363% และ 26.7% ตามลำดับ และเมื่อทำการทวนสอบผลที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ด้วยผลการทดลองพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย โดยสรุปจากผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่ากระบวนการทอรีรีแฟคชันเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสำหรับปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์มเปล่า

คำสำคัญ : กระบวนการทอรีรีแฟคชัน ; ทะลายปาล์มเปล่า ; สมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ; วิธีพื้นผิวตอบสนอง

*Corresponding author. E-mail : chokchai@tsu.ac.th



Abstract

Palm empty fruit bunch (PEFB) is waste material from palm oil processing. It has potential as a renewable energy resource. However, direct processing is undesirable due to poor properties of the fuel obtained. Therefore, this research aims to improve the properties of fuel produced from PEFB by using a torrefaction process. Central composite design (CCD) and response surface methodology (RSM) were applied to optimize the process. The interactions of the independent parameters including temperature (200 - 320°C) and time (5 – 50 min) with the dependent parameters consisting of mass yield (%MY), moisture content (%MC), volatile organic content (%VC), ash content (%AC), fixed carbon content (%FC) and heating value (HV) were determined. The experimental results were fitted to a quadratic equation which was also validated. Analysis of variance (ANOVA) was used to evaluate the influence of individual parameters. The high R^2 values of the results indicated the good agreement of the generated model with the predicted and actual responses. The optimal values of temperature and time for torrefaction of PEFB were found to be 278°C and 23 min, respectively. Under this condition, the %MY of torrefied product was 36.7%. It was found that %MC and %VC decreased 92.0% and 31.6% while %FC and HV increased 1,367.5% and 26.7%, respectively. The model accuracy was verified through triplicate experiments that produced small discrepancies between predicted and actual values. In conclusion, these studies revealed that torrefaction has the potential to improve the quality of fuel produced from PEFB.

Keywords : torrefaction process ; palm empty fruit bunch ; fuel property response ; surface methodology

บทนำ

จากความต้องการทางด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและเศรษฐกิจ โดยพลังงานหลักที่นำมาใช้ในปัจจุบันเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจึงส่งผลให้ราคามีการปรับตัวสูงขึ้น อีกทั้งปิโตรเลียมที่นำมาใช้งานจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากจะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่จะทำให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น พลังงานจากชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งของพลังงานเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากปิโตรเลียม เนื่องจากชีวมวลสามารถที่จะปลูกทดแทนได้ ดังนั้นประเทศไทยจึงมีนโยบายที่จะกระตุ้น และสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานจากชีวมวลมากขึ้น โดยจากสถิติพบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี พ.ศ. 2560 จำนวน 80,752 พันตันน้ำมันดิบ (kiloton of oil equivalent, ktoe) ซึ่งเป็นพลังงานที่มาจากพลังงานทดแทนชนิดต่าง ๆ จำนวน 11,731 ktoe ซึ่งคิดเป็น 14.5% โดยในจำนวนนี้มีการใช้พลังงานจากชีวมวลเพียง 7,378 ktoe ซึ่งคิดเป็นเพียง 9.1% ของพลังงานขั้นสุดท้าย (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2018a) ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับศักยภาพ



ทางด้านชีวมวลของประเทศไทย ซึ่งเป็นเมืองเกษตรกรรมที่สามารถผลิตชีวมวลได้หลากหลายชนิด เช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด กากมันสำปะหลัง ไม้ยางพารา วัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

ทะลายปาล์มเปล่า (Palm empty fruit bunch) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีปริมาณ 0.32 ตันต่อตันน้ำหนักทะลายปาล์ม (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2018b) ซึ่งจากปริมาณดังกล่าวจะเห็นว่ามีความเหมาะสมในเชิงปริมาณที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง แต่อย่างไรก็ตามการนำทะลายปาล์มเปล่ามาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ความชื้นสูง ค่าพลังงาน และความหนาแน่นพลังงานต่ำ อัตราส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) สูง จึงสามารถดูดซับความชื้นจากอากาศได้เป็นอย่างดี และเนื่องจากมีความเป็นเส้นใยสูงจึงต้องใช้พลังงานมากในการบดย่อย (Chen *et al.*, 2015) ดังนั้นเพื่อให้การนำทะลายปาล์มเปล่ามาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (Torrefaction process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้น และปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง (Fuel property) (Tong *et al.*, 2018) โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนที่อุณหภูมิ 230 - 300°C (Oh *et al.*, 2019) ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าความชื้นลดลง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวล ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถบดย่อยได้ง่ายขึ้น อีกทั้งมีอัตราส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอนต่ำลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง (Zhang *et al.*, 2018) ซึ่งจะเป็นผลดีในแง่ของการเก็บรักษาเชื้อเพลิง ยิ่งไปกว่านั้นกระบวนการนี้ยังทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในชีวมวลลดลง จึงส่งผลให้มีความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้นซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้เป็นอย่างดี (van der Stelt *et al.*, 2011; Proskurina *et al.*, 2017) ซึ่ง Singh *et al.* (2019) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราการให้ความร้อนต่อกระบวนการทอรีแฟคชันของ *Acacia nilotica* โดยใช้ fixed-bed reactor และทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค Response surface methodology (RSM) ผลการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความร้อน และร้อยละผลได้ของพลังงานสูงที่สุดที่สภาวะอุณหภูมิ 252°C เป็นเวลา 60 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที โดยอุณหภูมิจะส่งผลต่อค่าความร้อน และร้อยละผลได้ของพลังงานเป็นอย่างมาก ในขณะที่ระยะเวลา และอัตราการให้ความร้อนจะส่งผลเพียงเล็กน้อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมี %MC อัตราส่วนของ H/C และ O/C ลดลง 73.23% 52.94% และ 46.22% ซึ่งจะส่งผลให้ %FC และ Higher heating value เพิ่มขึ้น 75.54% และ 18.62% ตามลำดับ นอกจากนี้ Buratti *et al.* (2018) ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราการให้ความร้อนต่อกระบวนการทอรีแฟคชันของแกลบ และกากกาแฟ โดยออกแบบการทดลองด้วย RSM แบบ Box-Behnken design (BBD) ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิจะส่งผลต่อการสูญเสีย น้ำหนัก และค่า HV สูงที่สุด รองลงมาคือเวลา และอัตราการให้ความร้อนตามลำดับ และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันของแกลบกาแฟ คือที่อุณหภูมิ 271.7°C เป็นเวลา 20 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที และสภาวะที่เหมาะสมของกากกาแฟคือที่อุณหภูมิ 256.0°C เป็นเวลา 20 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 25°C/นาที อีกทั้ง Nam และ Capareda (2015) ได้ทำการศึกษาระบวนการทอรีแฟคชันของฟางข้าว และก้านฝ้าย โดยออกแบบการทดลองด้วย RSM ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 210°C ด้วยเวลา 20 นาที จะส่งผลให้น้ำหนักของฟางข้าว และก้านฝ้ายลดลงในช่วง 13 – 48% และ 9 – 50% ตามลำดับ และมีค่า energy recovery เท่ากับ 77% สำหรับฟางข้าว และ 68%

สำหรับก้านฝ้าย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่า HV เท่ากับ 28.6 MJ/kg ยิ่งไปกว่านั้น Lee *et al.* (2012) ศึกษาการทอรีไฟเบอร์ของไม้เนื้ออ่อนผสมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ RSM ผลการศึกษาพบว่า severity factor ซึ่งเป็นค่าปัจจัยที่เกิดจากอุณหภูมิ และเวลาของกระบวนการทอรีไฟเบอร์จะส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นั่นคือ จะส่งผลให้ปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้น ไฮโดรเซลลูโลสลดลง ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วง 50.79 – 57.36% และส่งผลให้ปริมาณของไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง

งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอรีไฟเบอร์ของทะเลาะปาล์มเปล้า เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะเลาะปาล์มเปล้า ได้แก่ การลดปริมาณความชื้น และสารอินทรีย์ระเหยง่าย การเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นพลังงานของทะเลาะปาล์มเพิ่มขึ้น โดยการศึกษาจะใช้เทคนิค Response surface methodology (RSM) แบบ Central composite design (CCD) สำหรับการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรีไฟเบอร์ ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา

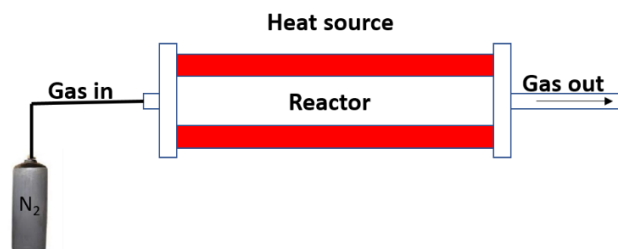
วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบ และสารเคมี

ทะเลาะปาล์มที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นผลิตภัณฑ์พิเศษเหลือจากกระบวนการผลิตของบริษัท ปาล์มดีศรีนคร จำกัด ซึ่งเมื่อออกจากกระบวนการผลิตจะถูกสับให้มีขนาดประมาณ 2 - 10 เซนติเมตร และเมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า มีปริมาณความชื้น 7.77% ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย 86.72% ปริมาณเถ้า 3.23% ปริมาณคาร์บอนคงตัว 2.28% และมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,332 cal/g

การศึกษากระบวนการทอรีไฟเบอร์ของทะเลาะปาล์ม

กระบวนการทอรีไฟเบอร์ของทะเลาะปาล์มเปล้าจะทำการศึกษาโดยใช้ท่อปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และยาว 50 เซนติเมตรบรรจุในเตาเผาแบบท่อเพื่อใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1 ทะเลาะปาล์มเปล้า 30 กรัมจะถูกบรรจุไว้ในท่อปฏิกรณ์ จากนั้นทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาทีตลอดเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นกระบวนการ เพื่อไล่ออกซิเจนภายในท่อปฏิกรณ์ พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิ และเวลาตามที่ได้ออกแบบการทดลองด้วย CCD สุดท้ายผลิตภัณฑ์ที่ได้จะนำไปวิเคราะห์สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงต่อไป



ภาพที่ 1 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทอรีไฟเบอร์ของทะเลาะปาล์มเปล้า

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์ม

จากการศึกษาที่ก่อนหน้านี้ ถึงความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ต่อกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์มพบว่าปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการทอรีแฟคชัน (Indum *et al.*, 2019) ดังนั้นจึงนำเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการทอรีแฟคชันมาทำการออกแบบการทดลองต่อด้วย RSM แบบ CCD โดยแต่ละตัวแปรจะประกอบด้วย 5 ระดับ คือ $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ก็เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรีแฟคชัน ซึ่งเมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลง อาจส่งผลให้ตัวแปรอื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการทอรีแฟคชัน ทำให้ต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic relationship) ดังนั้นจึงได้นำ RSM ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวแปร มาใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชัน เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ผลที่ได้จากการทดลองจะนำมาใช้ในการสร้างสมการ เพื่อใช้ในการทำนายผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ศึกษา ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

โดยที่ Y คือค่าของตัวแปรตอบสนอง; X_i และ X_j คือตัวแปรอิสระ; β_0 คือค่าคงที่; β_j , β_{jj} และ β_{ij} คือค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง, สัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังสอง และสัมประสิทธิ์ของปฏิกริยาสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ตามลำดับ; k คือจำนวนตัวแปรอิสระ (สำหรับการศึกษานี้ $k = 2$)

ตารางที่ 1 ตัวแปรในกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์มเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลองด้วย CCD

ตัวแปรอิสระ	ระดับ				
	$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
อุณหภูมิ (X_1 , °C)	200	217.6	260.0	302.4	320
เวลา (X_2 , min)	5	11.6	27.5	43.4	50

การวิเคราะห์สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะเลายปาล์ม

สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะเลายปาล์มที่ทำการศึกษาประกอบด้วย %MC %VC %AC %FC และ HV โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งการวิเคราะห์จะเริ่มจากการหา %MC โดยนำตัวอย่างทะเลายปาล์มมาอบที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจะนำไปวิเคราะห์ %VC โดยการให้ความร้อนด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 7 นาที ขั้นตอนสุดท้ายผลิตภัณฑ์ที่เหลือจะนำไปวิเคราะห์ %AC ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดย %MC %VC %AC และ %FC สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) – (5) และ HV ของทะเลายปาล์มเปล่าจะสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter รุ่น IKA C2000 basic



$$\%MC = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบที่อุณหภูมิ } 105 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังอบที่อุณหภูมิ } 105 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนอบที่อุณหภูมิ } 105 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\%VC = \frac{\text{น้ำหนักก่อนเผาที่อุณหภูมิ } 900 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิ } 900 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนเผาที่อุณหภูมิ } 900 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%AC = \frac{\text{น้ำหนักก่อนเผาที่อุณหภูมิ } 750 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิ } 750 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนเผาที่อุณหภูมิ } 750 \text{ }^{\circ}\text{C (กรัม)}} \times 100 \quad (4)$$

$$\%FC = 100 - \text{ปริมาณความชื้น (\%)} - \text{ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (\%)} - \text{ปริมาณเถ้า (\%)} \quad (5)$$

ผลการวิจัย

ผลการทดลองจากการออกแบบด้วย CCD และการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

การศึกษากระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลาะปาล์มเปล่าที่มีปัจจัยอิสระจำนวน 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา โดยการออกแบบการทดลองด้วย RSM แบบ CCD ได้จำนวนการทดลองทั้งสิ้น 11 การทดลอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีร้อยละของผลได้ (Mass yield, %MY) ในช่วง 24.00 – 61.67% ปริมาณความชื้น (Moisture content, %MC) ในช่วง 0.45 – 3.10% ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic content, %VC) ในช่วง 45.77 – 88.08% ปริมาณเถ้า (Ash content, %AC) ในช่วง 2.50 – 10.95% ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon content, %FC) ในช่วง 7.37 – 42.56% และค่าความร้อน (Heating value, HV) ในช่วง 4,083 – 5,840 cal/g ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย ANOVA สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนองด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least square regression) ผลปรากฏเป็นดังสมการที่ (6) – (11) ซึ่งข้อมูลจากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติเป็นดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่าตอบสนองที่ศึกษา ได้แก่ %MY %MC %VC %AC %FC และ HV มีค่า p-value เท่ากับ 0.0005 0.0002 0.0030 0.0006 0.0055 และ 0.0021 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า p-value ของ lack of fit ยังมีค่ามากกว่า 0.05 และเมื่อพิจารณาค่า R² adjust R² และค่า Adeq Precision ของค่าตอบสนองทุกตัวพบว่ามีค่า >0.9274 >0.8691 และ >10.584 ตามลำดับ ซึ่งหากสมการที่ได้มีค่า p-value ของสมการน้อยกว่า 0.05 (Jambo *et al.*, 2019) มีค่า p-value ของ lack of fit มากกว่า 0.05 (Shahzad *et al.*, 2019) มีค่า R² เข้าใกล้ 1 (Sakthivel *et al.*, 2019; Pakalapati *et al.*, 2019) และมีค่า Adeq Precision > 4 (Looi *et al.*, 2019) แสดงว่าสมการที่ได้สามารถใช้ในการทำนายค่าตอบสนองจากผลของปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลาะปาล์มเปล่าได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าข้อมูลที่ได้ในช่วงความเชื่อมั่นในระดับ 95% อีกทั้งลักษณะทางกายภาพของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทอรีแฟคชันด้วย ดังนั้น สมการที่ (6) – (11) จึงสามารถใช้ในการทำนายได้เฉพาะผลของอุณหภูมิ และเวลาในช่วงที่ทำการศึกษาคือกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลาะปาล์มเปล่าเพียงเท่านั้น



$$MY (\%) = 131.741 - 0.239X_1 - 1.963X_2 + 0.0023X_1X_2 - 0.000075X_1^2 + 0.0154X_2^2 \quad (6)$$

$$MC (\%) = 29.771 - 0.189X_1 - 0.092X_2 + 0.000083X_1X_2 + 0.00032X_1^2 + 0.00090X_2^2 \quad (7)$$

$$VC (\%) = 239.996 - 0.888X_1 - 0.665X_2 - 0.0031X_1X_2 + 0.0012X_1^2 + 0.017X_2^2 \quad (8)$$

$$AC (\%) = 16.258 - 0.133X_1 - 0.123X_2 + 0.0011X_1X_2 + 0.00031X_1^2 - 0.0011X_2^2 \quad (9)$$

$$FC (\%) = -185.974 + 1.210X_1 + 0.882X_2 + 1.911X_1X_2 - 1.815X_1^2 - 0.016X_2^2 \quad (10)$$

$$HV (\text{cal/g}) = -10629.2911 + 94.35145X_1 + 140.959X_2 - 0.296X_1X_2 - 0.141X_1^2 - 0.755X_2^2 \quad (11)$$



ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองด้วยแผนการทดลองแบบ CCD ของทะเลสาบปาล์มเปล้า (Mueanmas *et. al.*, 2020)

การทดลองที่	X_1	X_2	%MY		%MC		%VC		%AC		%FC		%HV	
			ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ
1	260.0	50.0	32.67	35.47	0.68	0.82	53.13	58.61	7.88	7.66	38.31	32.90	5841	5675
2	320.0	27.5	24.00	25.92	0.74	0.66	46.10	45.04	10.95	10.61	42.21	43.69	5735	5812
3	260.0	27.5	40.67	39.00	0.84	0.84	65.47	62.01	5.57	6.04	28.22	31.12	5485	5551
4	200.0	27.5	50.50	51.54	3.10	3.29	85.35	87.54	4.16	3.70	7.39	5.48	4337	4274
5	217.6	43.4	44.33	42.23	2.39	2.18	82.26	77.07	4.38	4.69	10.97	16.06	4955	5120
6	302.4	43.4	30.00	27.27	0.45	0.43	45.77	42.87	10.80	11.03	42.98	45.67	5743	5808
7	302.4	11.6	41.00	40.15	0.87	0.98	59.87	63.94	6.03	6.52	33.23	28.57	5670	5491
8	260.0	27.5	39.33	39.00	0.93	0.84	58.48	62.01	5.95	6.04	34.64	31.12	5722	5551
9	260.0	5.0	58.00	58.15	1.80	1.76	86.90	82.54	3.93	3.34	7.37	12.36	4483	4662
10	260.0	27.5	37.00	39.00	0.74	0.84	62.06	62.01	6.60	6.04	30.50	31.12	5446	5551
11	217.6	11.6	61.67	61.43	3.04	2.95	88.08	89.85	2.50	3.08	6.38	4.12	4083	4004
	R^2		0.9754		0.9848		0.9491		0.9729		0.9345		0.9561	
	Adjust R^2		0.9509		0.9696		0.8981		0.9458		0.8691		0.9122	



ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลองจากกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์มเปล่า

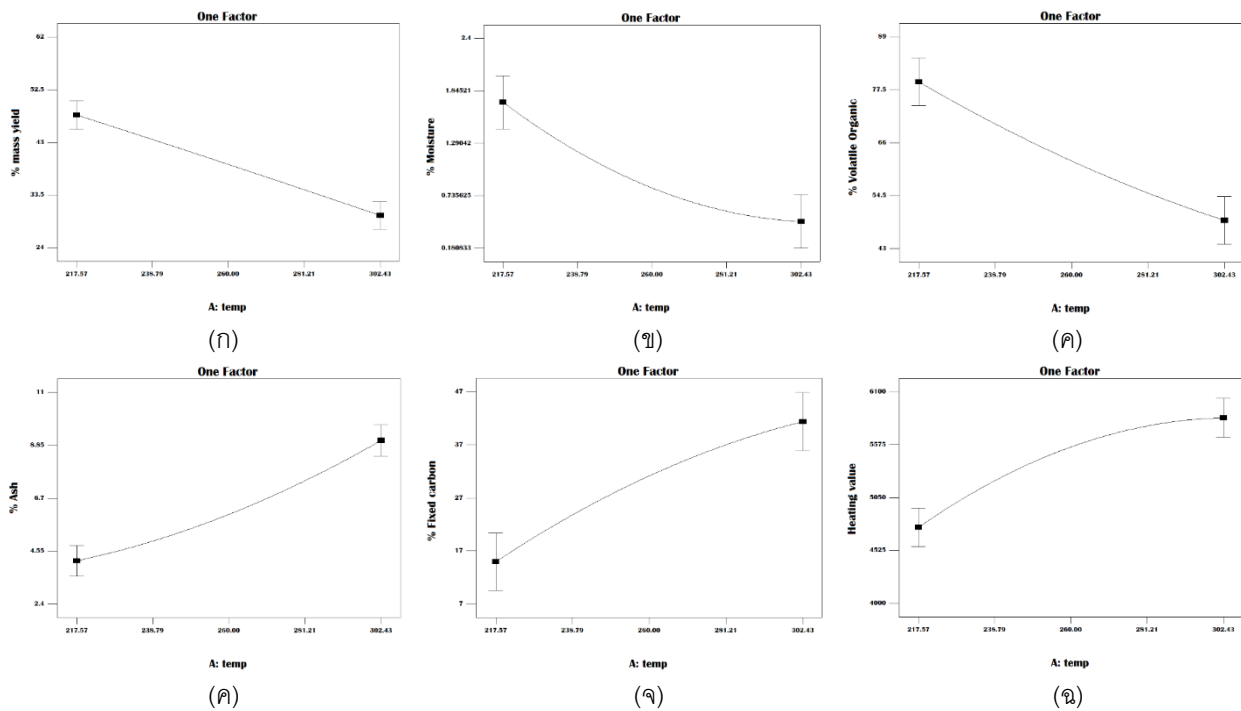
ปัจจัย	%MY		%MC		%VC		%AC		%FC		%HV	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
Model	39.70	0.0005	64.74	0.0002	18.63	0.0030	35.90	0.0006	14.27	0.0055	21.78	0.0021
X_1	102.02	0.0002	231.89	<0.0001	67.19	0.0004	119.87	0.0001	51.70	0.0008	64.43	0.0005
X_2	79.95	0.0003	29.57	0.0029	21.31	0.0058	47.01	0.0010	14.93	0.0118	27.93	0.0032
X_1X_2	1.56	0.2672	0.4205	0.5453	0.6387	0.4605	5.24	0.0708	0.24	0.6479	4.34	0.0916
X_1^2	0.0160	0.9041	61.07	0.0006	0.9636	0.3714	4.43	0.0893	2.13	0.2039	9.92	0.0254
X_2^2	13.39	0.0146	9.75	0.0262	3.86	0.1067	1.03	0.3561	3.61	0.1160	5.61	0.0641
Lack of Fit	2.45	0.3033	4.45	0.1888	2.99	0.2604	1.79	0.3787	3.78	0.2163	2.08	0.3412
Adeq	18.956		22.4356		12.2678		17.0477		10.584		12.7730	

วิจารณ์ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่อค่าตอบสนองสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลาปาล์มเปเล่

ผลของอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชัน

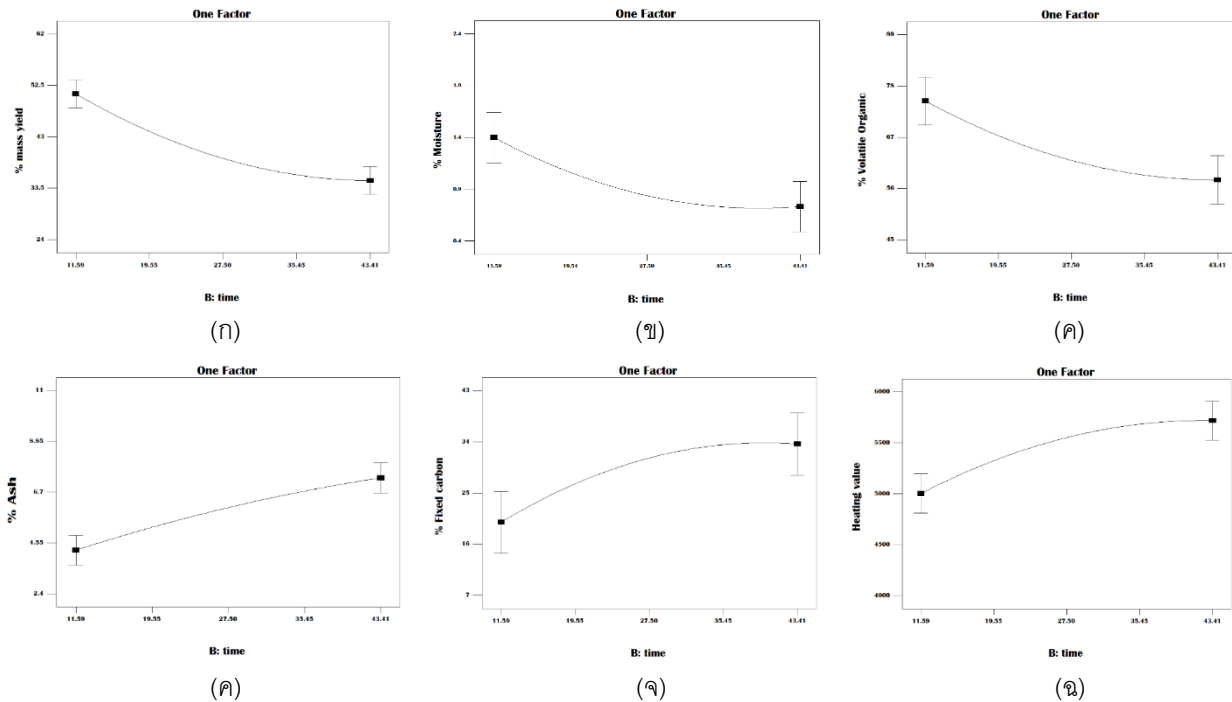
การศึกษาค่าอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลาปาล์มเปเล่ เป็นดังแสดงในภาพที่ 2(ก) – 2(ข) ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ %MY %MC และ %VC ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาจะทำให้ความชื้น และสารอินทรีย์ระเหยง่าย สามารถที่จะระเหยออกจากทะเลาปาล์มเปเล่ได้ ในขณะที่เดียวกันก็ส่งผลให้ %AC และ %FC มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อ %FC เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ HV มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 2 ผลของอุณหภูมิของกระบวนการทอรีแฟคชันต่อ (ก) %MY (ข) %MC (ค) %VC (ง) %AC (จ) %FC และ (ฉ) HV

ผลของเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน

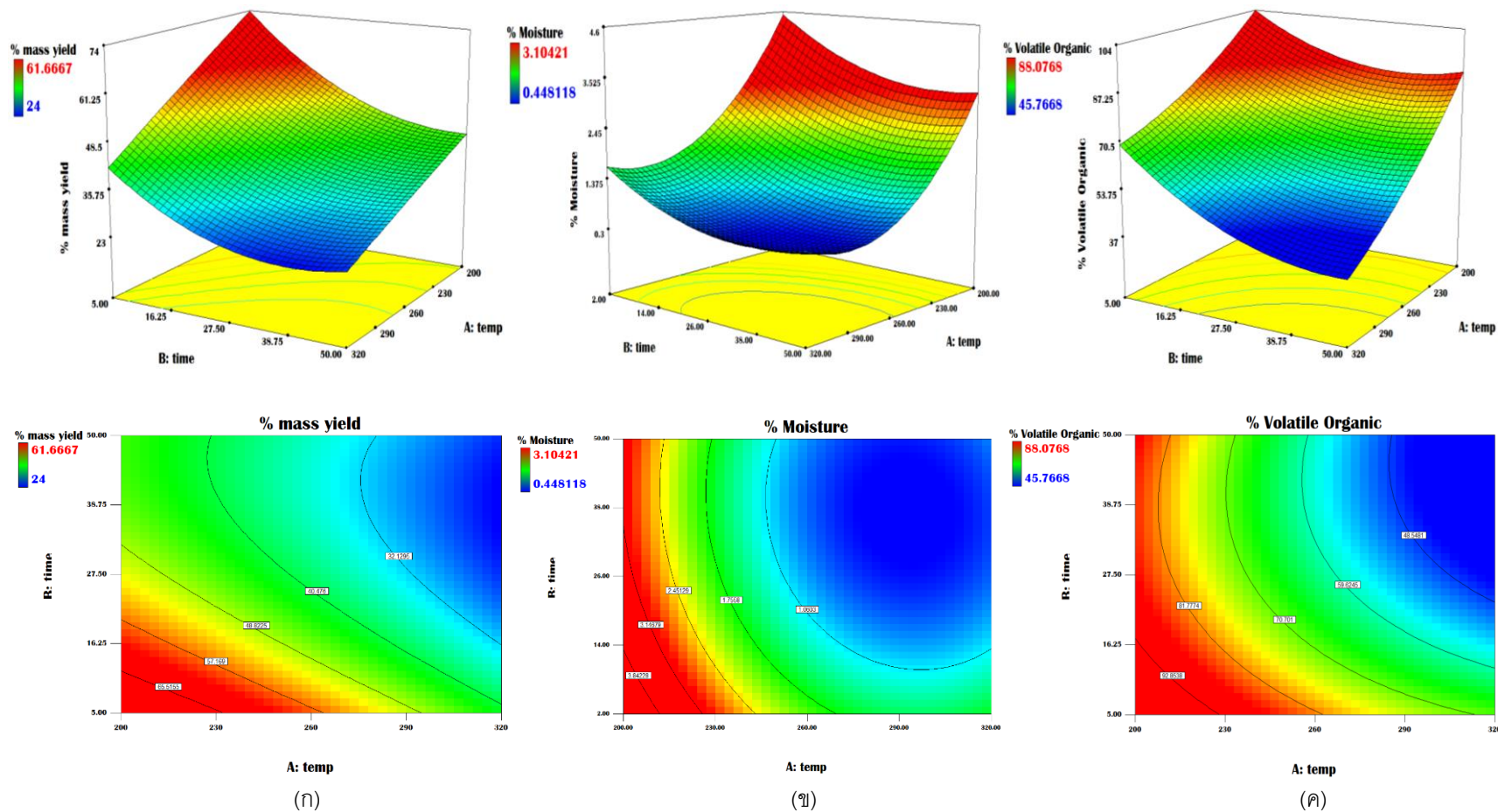
การศึกษาค่าอิทธิพลของเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชัน ผลที่ได้เป็นดังแสดงในภาพที่ 3(ก) – 3(ข) โดยผลที่ได้จะสอดคล้องกับอิทธิพลของอุณหภูมิ นั่นคือ เมื่อเวลาของการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ %MY %MC และ %VC ลดลง และในขณะที่เดียวกันก็จะส่งผลให้ %AC %FC และ HV เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการทอรีแฟคชันจะส่งผลให้เกิดการระเหยของความชื้น สารอินทรีย์ระเหยง่าย และการสลายตัวขององค์ประกอบของทะเลาปาล์มเปเล่ นั่นคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งส่งผลดีต่อสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) และค่าความร้อนสูงขึ้น



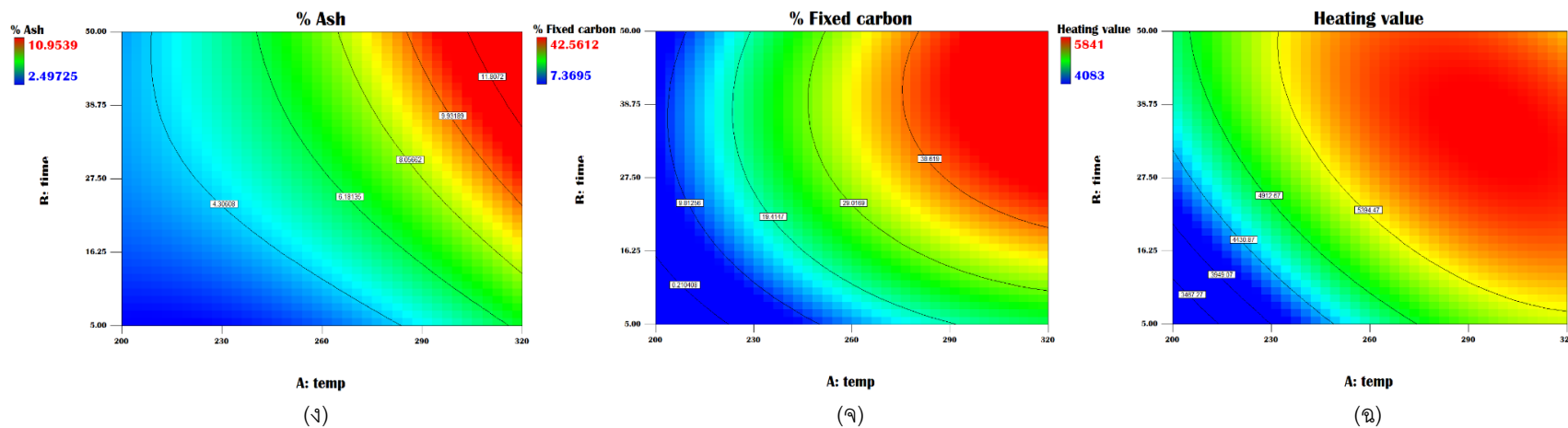
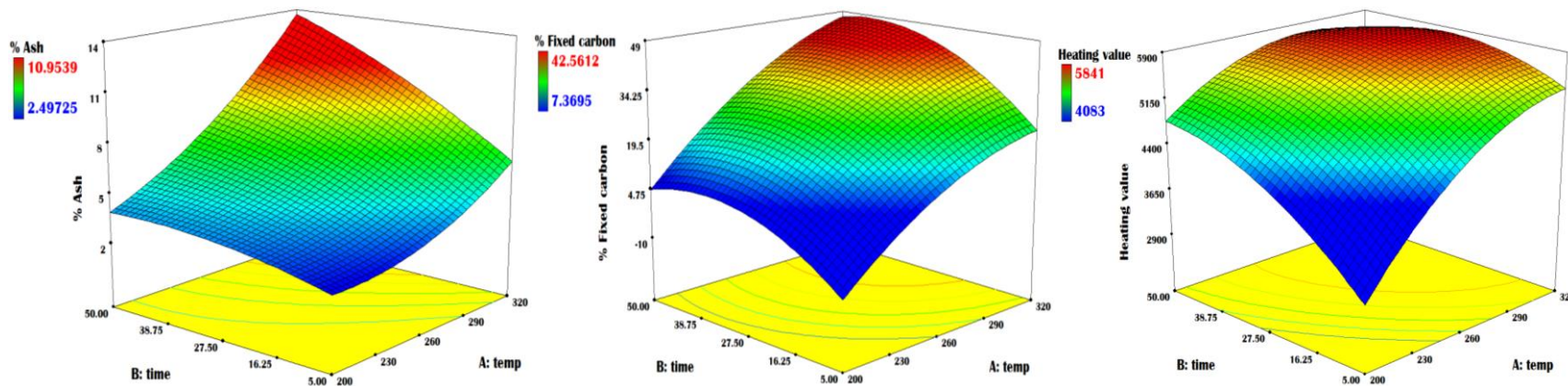
ภาพที่ 3 ผลของเวลาของกระบวนการทอรีแฟคชันต่อ (ก) %MY (ข) %MC (ค) %VC (ง) %AC (จ) %FC และ (ฉ) HV

ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ และเวลา

ปฏิสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทอรีแฟคชันของทะเลาะปาล์มเปล่าที่ส่งผลต่อ %MY %MC %VC %AC %FC และค่า HV สามารถแสดงเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่างดังรูปที่ 4(ก) – 4(ฉ) ซึ่งผลของปฏิสัมพันธ์บ่งบอกว่าเมื่ออุณหภูมิ และระยะเวลาในการทอรีแฟคชันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ %MY %MC และ %VC มีค่าลดลง แต่ในทางกลับกันจะส่งผลให้ %AC %FC และ HV มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลสืบเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการระเหยของความชื้น และสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีอยู่ในทะเลาะปาล์มเปล่าสามารถเกิดการระเหยได้มากขึ้น ประกอบกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลในทางบวกต่อการระเหยของสารทั้งสองชนิด จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี %FC ที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์สูงขึ้นก็จะช่วยให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4 กราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่าง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาต่อ (ก) %MY (ข) %MC (ค) %VC (ง) %AC (จ) %FC (ฉ) HV สำหรับกระบวนการทอวีไฟเคชันของทะเลาะปาล์ม



ภาพที่ 4 (ต่อ) กราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟโครงร่าง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาต่อ (ก) %MY (ข) %MC (ค) %VC (ง) %AC (จ) %FC (ฉ) HV สำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์ม

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์มเปล่า

การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์มเปล่า เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน optimization ในโปรแกรม Design Expert[®] ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่าง ๆ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมนั้นทำได้โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระอยู่ในช่วงขอบเขตที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิในช่วง 200 – 320 องศาเซลเซียส และเวลา ในช่วง 5 – 50 นาที และกำหนดเป้าหมายของ %MY %FC และค่า HV ให้มีค่าสูงสุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะได้อ้อยละของผลได้ที่สูง ประกอบกับมีปริมาณคาร์บอนที่สูง ซึ่งจะส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้เป้าหมายของ %MC %VC และ %AC จะมีการกำหนดให้มิต่ำสุด เนื่องจากค่าตอบสนองทั้ง 3 ค่าจะส่งผลในเชิงลบต่อคุณภาพการเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมที่สุดด้วยฟังก์ชัน Numerical optimization โดยวัดความพึงพอใจโดยรวม (Composite desirability; D) ของผลตอบสนองทุกค่า ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 ถ้าค่า D มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าผลตอบสนองนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ (Chanpirak *et al.*, 2018)

จากการทำนายด้วยสมการสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์มเปล่าเป็นดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่ากระบวนการที่อุณหภูมิ 277.83 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลา 22.61 นาที จะเป็นสภาวะที่ส่งผลให้ %MY %MC %VC %AC %FC และ HV มีค่าเท่ากับ 37.76% 0.7% 59.30% 33.46% 6.58% และ 5,634 cal/g ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการ พบว่า %MY %MC %VC %AC %FC และ HV มีค่าเท่ากับ 36.66% 0.76% 59.61% 33.36% 6.27% และ 5,488.33 cal/g ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% ยกเว้นความคลาดเคลื่อนของปริมาณความชื้นที่มีค่า 8.6% โดยเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นที่ได้จากการทำนาย และจากการทดลองมีค่าต่ำมาก (มีค่าน้อยกว่า 1) ซึ่งเมื่อค่าที่ได้ทั้งสองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ก็จะส่งผลให้ %ความคลาดเคลื่อนมีค่าต่างกันมาก

ตารางที่ 4 แสดงขอบเขตของตัวแปรอิสระและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชันของทะเลายปาล์มเปล่า

ปัจจัย	เป้าหมาย	ค่าต่ำ	ค่าสูง	สภาวะที่เหมาะสม		% ความคลาดเคลื่อน
				ค่าทำนาย	ค่าจากการทดลอง	
อุณหภูมิ (°C)	ในช่วงที่ศึกษา	200	320	277.83	278	-
เวลา (min)	ในช่วงที่ศึกษา	5	50	22.67	23	-
% MY	ค่าสูงสุด	-	-	37.76	36.66	2.9
% MC	ค่าต่ำสุด	-	-	0.7	0.76	8.6
% VC	ค่าต่ำสุด	-	-	59.30	59.61	0.5
% AC	ค่าต่ำสุด	-	-	33.46	33.36	0.3
% FC	ค่าสูงสุด	-	-	6.58	6.27	4.7
HV (cal/g)	ค่าสูงสุด	-	-	5,634	5,488	2.6

สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทอริไฟด์ทะเลายปาล์มเปล่า

จากการศึกษาสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอริไฟด์ของทะเลายปาล์มเปล่า พบว่า %MC %VC %AC %FC และ HV เป็นดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งจะเห็นว่ากระบวนการทอริไฟด์สามารถปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ทางด้านเชื้อเพลิงของทะเลายปาล์มเปล่า โดยทอริไฟด์ทะเลายปาล์มเปล่าที่ได้มีความชื้น และสารระเหยอินทรีย์ลดลงเท่ากับ 90.2% และ 31.2% ตามลำดับ ในขณะที่ %FC เพิ่มขึ้น 1,363% ซึ่งจะส่งผลทำให้ HV เพิ่มขึ้น 26.7% ตามลำดับ ทำให้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานเชื้อเพลิงแข็งชนิดถ่านอัดแท่ง และมีคุณภาพใกล้เคียงกับถ่านหินชนิดซับบิทูมินัส

ตารางที่ 5 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทอริไฟด์ทะเลายปาล์มเปล่า

สมบัติด้าน เชื้อเพลิง	มาตรฐานเชื้อเพลิงแข็ง		ถ่านหินซับบิทูมินัส ³	ทะเลายปาล์มเปล่า	ทอริไฟด์ทะเลายปาล์มเปล่า
	ถ่านอัดแท่ง ¹	ถ่านไม้หุงต้ม ²			
% MC	<8	<10	30 - 38	7.77	0.76
% VC	-	<25	-	86.72	59.61
% AC	-	<8	1 - 10	3.23	6.27
% FC	-	-	-	2.28	33.36
HV (cal/g)	>5,000	>6,000	4,500 – 5,500	4,332	5,488

¹ Thai industrial standard institute, 2004a

² Thai industrial standard institute, 2004b

³ Unique Mining Services Public Company Limited, 2003

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิ (200 – 320°C) และเวลา (5 – 50 นาที) สำหรับกระบวนการทอริไฟด์ของทะเลายปาล์มเปล่า โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ได้แก่ %MC %VC %AC %FC และ HV ซึ่งผลการศึกษา พบว่าอุณหภูมิ และเวลาจะแปรผกผันกับ %MY %MC และ %VC แต่จะแปรผันตรงกับ %AC %FC และ HV โดยเมื่อใช้อุณหภูมิ 278°C และเวลา 23 นาที จะส่งผลให้ %MY มีค่าเท่ากับ 36.66% ซึ่ง %MC และ %VC จะลดลง 90.2% และ 31.2% ตามลำดับ ในขณะที่ %FC และ HV เพิ่มขึ้น 1,363% และ 26.7% ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่เป็นไปตามมาตรฐานเชื้อเพลิงแข็งชนิดถ่านอัดแท่ง และมีคุณภาพใกล้เคียงกับถ่านหินชนิดซับบิทูมินัส

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประเภททุนสร้างสถานภาพนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2560



เอกสารอ้างอิง

- Buratti, C., Barbanera, M., Lascaro, E., & Cotana, F. (2018). Optimization of torrefaction conditions of coffee industry residues using desirability function approach. *Waste Management, 73*, 523-534.
- Chanpirak, A., Dumnin, P., & Hongpuay, A. (2018). Optimization of Oil Extraction from Spent Coffee Grounds (*Coffa canephora var. robusta/Coffea arabica*) by Hexane Using Response Surface Methodology. *The Journal of KMUTNB, 28(4)*, 799-811.
- Chen, W.-H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44*, 847-866.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2018a). *Proportion using of renewable energy*. Retrieved April 10, 2019, from http://www.dede.go.th/download/stat62/1_Energy_Consumption_2561.pdf (in Thai)
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2018b). *Biomass energy potential from oil palm: Empty Fruit Bunch*. Retrieved April 22, 2019, from http://webkc.dede.go.th/test_max/node/2529 (in Thai)
- Indum, P., Mueanmas, C., & Rattanawilai, S. (2019). Screening the Factors Affecting Torrefaction of Palm Empty Fruit Bunches by Using Plackett-Burman Design. *KKU Research Journal (Graduate Studies), 19(4)*. 86-99. (in Thai)
- Jambo, S. A., Abdulla, R., Marbawi, H., & Gansau, J. A. (2019). Response surface optimization of bioethanol production from third generation feedstock – *Eucheuma cottonii*. *Renewable energy, 132*, 1-10.
- Lee, J.-W., Kim, Y.-H., Lee, S.-M., & Lee, H.-W. (2012). Optimizing the torrefaction of mixed softwood by response surface methodology for biomass upgrading to high energy density. *Bioresource Technology, 116*, 471-476.
- Looi, Y. F., Ong, S. P., Julkifle, A., & Alias, M. S. (2019). Effects of pretreatment and spray drying on the physiochemical properties and probiotics viability of Moringa (*Moringa oleifera* Lam) leaf juice powder. *Journal of Food Processing and Preservation, 1*-15.
- Mueanmas, C., Indum, P., & Nikhom, R. (2020). A study of factors affecting to torrefaction process of palm bunch using response surface methodology. *Engineering Journal Chiang Mai University, 27(1)*. Article in press. (in Thai)
- Nam, H., & Capareda, S. (2015). Experimental investigation of torrefaction of two agricultural wastes of different composition using RSM (response surface methodology). *Energy, 91*, 507-516.
- Oh, K. C., Park, S. Y., Kim, S. J., Choi, Y. S., Lee, C. G., Cho, L. H., & Kim, D. H. (2019). Development and validation of mass reduction model to optimize torrefaction for agricultural byproduct biomass. *Renewable Energy, 139*, 988-999.



- Pakalapati, H., Arumugasamy, S. K., & Khalid, M. (2019). Comparison of response surface methodology and feedforward neural network modeling for polycaprolactone synthesis using enzymatic polymerization. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 1 – 11.
- Proskurina, S., Heinimo, J., Schipfer, F., & Vakkilainen, E. (2017). Biomass for industrial applications: The role of torrefaction. *Renewable Energy*, 111, 265-274.
- Sakthivel, R., Ramesh, K., Marshal, S. J. J., & Sadasivuni, K. K. (2019). Prediction of performance and emission characteristics of diesel engine fueled with waste biomass pyrolysis oil using response surface methodology. *Renewable energy*, 136, 91 – 103.
- Shahzad, A., Iqtedar, M., Saeed, H., Hussain, S. Z., Chaudhary, A., Abdullah, R., & Kaleem, A. (2019). Mycosynthesis of size-controlled silver nanoparticles through optimization of process variables by response surface methodology. *Polish Journal of Microbiology*, 1-8.
- Singh, S., Chakraborty, J. P., & Mondal, M. K. (2019). Optimization of process parameters for torrefaction of *Acacia nilotica* using response surface methodology and characteristics of torrefied biomass as upgraded fuel. *Energy*, 186, Article 115865.
- Thai industrial standard institute. (2004a). *Community product standard: charcoal briquetted*. Retrieved Apr, 24, 2019, from http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps238_47.pdf (in Thai)
- Thai industrial standard institute. (2004b). *Community product standard: charcoal cooking*. Retrieved April 24, 2019, from <https://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/standard2.php> (in Thai)
- Tong, S., Xiao, L., Li, X., Zhu, X., Liu, H., Luo, G., Worasuwannarak, N., Kerdsuwan, S., Fungtammasan, B., & Yao, H. (2018). A gas-pressurized torrefaction method for biomass wastes. *Energy Conversion and Management*, 173, 29-36.
- Unique Mining Services Public Company Limited. (2003). *Product or service characteristics*. Retrieved April 24, 2019, from http://capital.sec.or.th/webapp/corp_fin/datafile/56/20040825T06.DOC (in Thai)
- van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasiński, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35, 3748-3762.
- Zhang, C., Ho, S.-H., Chen, W.-H., Xie, Y., Liu, Z., & Chang, J.-S. (2018). Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. *Applied Energy*, 220, 598-604.