วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)
ปีที่ 19 ฉบับที่ 4: ตุลาคม-ธันวาคม 2562

การคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มโดยใช้การออกแบบการทดลองด้วย

Plackett-Burman Design Screening the Factors Affecting Torrefaction of Palm Empty Fruit Bunches by Using Plackett-Burman Design

ปนัดดา อินทร์ดำ (Panadda Indum)* ดร.โชคชัย เหมือนมาศ (Dr.Chokchai Mueanmas)[1]**
ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล (Dr.Sukritthira Ratanawilai) ***

(Received: *December 17, 2018*; Revised: *January 18, 2019*; Accepted: *January 23, 2019*)

บทคัดย่อ

ทอร์รีแฟคชัน เป็นกระบวนการเคมีเชิงความร้อนสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลโดยใช้อุณหภูมิในช่วง 200-320 องศาเซลเซียสในสภาวะที่อับอากาศ ซึ่งการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อ กระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วย Plackett - Burman Design เพื่อคัดเลือกปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณออกซิเจน อัตราการให้ความร้อน และขนาดของทะลายปาล์ม ที่ส่งผลต่อผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อน ซึ่งนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ จะแสดงด้วยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ซึ่งผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา

ABSTRACT

Torrefaction is a thermochemical treatment for the production of solid fuel from biomass which promotes the increasing of fuel quality. This process involves the heating of lignocellulose at temperature range 200-320^{o}C in the absence of oxygen. The decomposition of cellulose, hemicellulose and lignin depends on several parameters. This research aims to investigate the screening of factors affecting torrefaction of palm empty fruit bunches which is a waste from oil palm tree. A Plackett–Burman experimental design is applied for screening the influence of operation parameters such as temperature, time, oxygen content, heating rate and palm empty fruit bunches size. Mass yield, moisture content, volatile matter, fixed carbon content, ash content and calorific value are analyzed as the response to evaluate the performance of torrefaction conditions. The significant parameters are selected based on the analysis of variance (ANOVA) results. The results show that the temperature and time are significant parameters.

คำสำคัญ: กระบวนการทอร์รีแฟคชัน ทะลายปาล์ม การออกแบบการทดลอง Plackett-Burman Design

Keywords: Torrefaction process, Palm empty fruit bunches, Experimental design, Plackett-Burman Design

[1] *Correspondent author: chokchai@tsu.ac.th*

** นิสิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง*

*** อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง*

**** อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่*

บทนำ

ชีวมวลจัดเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตพลังงานได้ โดยในปัจจุบันจัดเป็นแหล่งพลังงานที่มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลมีความเหมาะสมต่อสถานการณ์ของการใช้พลังงานในยุคนี้ นั่นคือ ไม่ก่อมลภาวะที่ส่งผลให้เกิดสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะถูกใช้ไปเพื่อการสังเคราะห์แสงของพืชในขั้นตอนของการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติมออกสู่ชั้นบรรยากาศ อีกทั้งเชื้อเพลิงชีวมวลยังมีราคาถูก สามารถผลิตทดแทนได้อย่างต่อเนื่องและผลิตได้ภายในประเทศซึ่งสามารถลดต้นทุนการขนส่งในการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ รวมถึงสามารถสร้างรายได้ให้แก่ชุมชนในท้องถิ่นได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้ภาครัฐจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญ และประโยชน์ของพลังงานจากชีวมวล จึงมีนโยบายในการส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากชีวมวลเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ โดยได้บรรจุไว้เป็นส่วนหนึ่งของยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560-2564) อีกทั้งยังได้กำหนดให้พลังงานทดแทนเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติรายประเด็น (ปี 2560) เพื่อความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืนทางด้านพลังงานของไทย สู่การพึ่งพาตนเอง และสามารถพัฒนาพลังงานใหม่ได้

ประเทศไทยมีพืชเกษตรกรรมหลายอย่างที่สามารถนำมาใช้เป็นชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานได้ โดยในพื้นที่ภาคใต้จะมีปริมาณของปาล์มน้ำมันเป็นหลัก ซึ่งจะมีเศษวัสดุเหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวหรือจากการแปรรูปที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานได้ โดยจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพบว่า ปาล์มน้ำมัน 1 ตัน จะให้วัสดุเหลือใช้ที่เป็นทะลายปาล์มเปล่า 0.32 ตัน เส้นใยปาล์ม 0.19 ตัน และกะลาปาล์ม 0.04 ตัน [1] ซึ่งเป็นปริมาณที่มีศักยภาพมากพอในการที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล อย่างไรก็ตาม ชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมยังมีปัญหาและข้อจำกัดในการใช้เป็นพลังงานอยู่หลายประการ ได้แก่ ค่าความร้อนต่ำเนื่องจากมีปริมาณความชื้นสูง ความหนาแน่นของพลังงานและประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยกระบวนการที่น่าสนใจและได้รับความนิยมคือการทอร์รีแฟคชัน (Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวมวล โดยใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200 – 320 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ควบคุมปริมาณของอากาศ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ดีขึ้น ความหนาแน่นและความชื้นต่ำ จึงสามารถทำให้ลดภาระค่าขนส่งที่ระยะทางไกล ๆ ลงได้ ยิ่งไปกว่านั้นค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1.4 เท่า จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอร์รีแฟคชันมีศักยภาพทดแทนถ่านหินได้เป็นอย่างดี [2] โดยผลการศึกษาการทอร์รีแฟคชันไม้ยูคาลิปตัสของ Cardona S, Gallego LJ, Valencia V, Martínez E, Rios LA. [3] พบว่าผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่ได้มีความหนาแน่นของพลังงานสูงขึ้น 29% และมีคุณสมบัติเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับถ่านหินตระกูลลิกไนต์ อีกทั้ง Gan YY, Ong HC, Ling TC, Chen W-H, Chong CT. [4] ยังพบว่าการทอร์รีแฟคชันสามารถเพิ่มค่าความร้อนของกะลาเมล็ดสบู่ดำได้ถึง 1.243 เท่า ในขณะเดียวกันก็จะสามารถลดอัตราส่วนของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน ซึ่งจะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพที่ดีขึ้น

ในบทความวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วย Plackett - Burman Design เพื่อคัดเลือกปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณออกซิเจน อัตราการให้ความร้อน และขนาดของทะลายปาล์มที่ส่งผล

ต่อผลได้เชิงมวล ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้าและค่าพลังงานความร้อน ซึ่งนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ จะแสดงด้วยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และการวิเคราะห์ perturbation

วัสดุและวิธีการวิจัย

1. วัสดุ

ทะลายปาล์ม เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการหีบน้ำมันปาล์มดิบของบริษัท ปาล์มดีศรีนคร จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดิบ โดยทะลายปาล์มที่ผ่านกระบวนการหีบจะนำเข้าเครื่องสับ ซึ่งทะลายปาล์มสับที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบจะมีขนาดในช่วง 2 – 10 เซนติเมตร

2. อุปกรณ์

การศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันจะใช้เตาปฏิกรณ์แบบท่อแนวนอนทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และให้ความร้อนด้วยเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) ดังภาพที่ 1 การทดลองจะบรรจุทะลายปาล์มในเตาปฏิกรณ์ และป้อนไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในระบบ จากนั้นจึงควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ตามการออกแบบการทดลองด้วย Plackett - Burman Design เมื่อครบกำหนดแต่ละสภาวะการทดลอง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิง

3. วิธีการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลองด้วย Plackett – Burman Design

การศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มจะออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design – Expert ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์เชิงสถิติและสามารถทำนายผลการทดลองได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบ ด้วย Plackett-Burman Design ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล 2 ระดับ ได้แก่ ค่าต่ำ (-1) และค่าสูง (+1) เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองที่ต้องการจากปัจจัยจำนวนมาก โดยได้กำหนดปัจจัยในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทอร์รีแฟคชันดังแสดงในตารางที่ 1

3.2 ผลได้เชิงมวล (Mass yield)

บรรจุทะลายปาล์ม 20 กรัม ในเตาปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชัน แล้วควบคุมสภาวะของปัจจัยที่ศึกษาตามที่กำหนด จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ และคำนวณร้อยละผลได้เชิงมวลดังสมการที่ (1)

$$\text{ผลได้เชิงมวล (\%)} = \frac{\text{มวลทะลายปาล์มหลังกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (กรัม)}}{\text{มวลทะลายปาล์มก่อนกระบวนการทอร์รีแฟคชัน (กรัม)}} \times 100 \quad (1)$$

3.3 การวิเคราะห์แบบกะประมาณ (Proximate Analysis)

3.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture) ตามมาตรฐาน ASTM D3173

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นทำได้โดยบรรจุตัวอย่างลงในครูซิเบิลประมาณ 1 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำครูซิเบิลออกมาวางไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ 1 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบซ้ำอีกครั้งจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่หรือลดน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัม คำนวณหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างโดยใช้สมการที่ (2)

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)}} \times 100 \quad (2)$$

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatiles matter) ตามมาตรฐาน ASTM D3175

การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยทำได้โดยนำตัวอย่าง 1 กรัมใส่ในครูซิเบิล เผาที่ระดับอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 7 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักส่วนที่เหลือและคำนวณหาปริมาณสารระเหยดังสมการที่ (3)

$$\text{ปริมาณสารระเหย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักอบแห้ง (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลังอบที่อุณหภูมิ 900 °C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักอบแห้ง (กรัม)}} \times 100 \quad (3)$$

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) ตามมาตรฐาน ASTM D3173

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าทำได้โดยนำตัวอย่าง 1 กรัม บรรจุในครูซิเบิล เผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำครูซิเบิลออกมาวางไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ชั่งน้ำหนักครูซิเบิลแล้วนำไปเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 750 °C อีก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจน กว่าน้ำหนักลดลงไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม จึงจะนำน้ำหนักสุดท้ายที่ชั่งได้มาคำนวณหาปริมาณเถ้าดังสมการที่ (4)

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิงหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C (กรัม)}}{\text{น้ำหนักอบแห้ง (กรัม)}} \times 100 \quad (4)$$

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

เป็นการวิเคราะห์ส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของเถ้าลอย ใช้วิธีการคำนวณด้วยร้อยละของผลต่างของปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า ดังสมการที่ (5)

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - \text{ความชื้น (\%)} - \text{สารระเหย (\%)} - \text{เถ้า (\%)} \quad (5)$$

3.4 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน (Calorific value analysis)

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงจากทะลายปาล์ม จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter รุ่น IKA C2000 basic

ผลการวิจัย และอภิปรายผล

1. คุณลักษณะของทะลายปาล์มสดและทะลายปาล์มที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

ทะลายปาล์มสด (ภาพที่ 2(ก)) เป็นผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ มีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียว สีน้ำตาล ที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเท่ากับ 42.2%, 32.2% และ 13.3% ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukiran MA, Abnisa F, Daud WMAW, Bakar NA, Loh SK. [5] เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นดังภาพที่ 2(ข) ซึ่งมีสีเข้มขึ้นจนเป็นสีดำ ความแข็งลดลง และมีความเปราะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิจัยของ Peng JH, Bi XT, Sokhansanj S, Lim CJ. [6] โดยเมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของทะลายปาล์มสด พบว่า มีปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 7.77%, 86.72%, 2.28%, 3.23% และ 4,332 Cal/g ตามลำดับ

2. ผลการออกแบบการทดลองสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันด้วยแผนการทดลอง Plackett – Burman Design

การศึกษานี้เป็นการออกแบบการทดลองด้วย Plackett – Burman Design เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟคชัน โดยผลการทดลองเป็นดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าผลได้เชิงมวลมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพิ่มขึ้น โดยผลได้เชิงมวลสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 91.5% และ 30.5%

ตามลำดับ ความชื้นเป็นคุณสมบัติหนึ่งของเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญ ซึ่งปริมาณความชื้นจะส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง หากมีปริมาณความชื้นสูงจะทำให้ค่าความร้อนลดลง โดยปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าในช่วง 2.07% - 2.62% ซึ่งมีค่าลดลงจากปริมาณความชื้นของทะลายปาล์มสดประมาณ 66% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukiran MA, Abnisa F, Daud WMAW, Bakar NA, Loh SK. [5] และ Peng JH, Bi XT, Sokhansanj S, Lim CJ. [6] สารระเหยเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการติดไฟก่อนจะเผาไหม้ ดังนั้นหากมีปริมาณสารระเหยมากเชื้อเพลิงจะสามารถติดไฟได้ง่าย และรวดเร็ว ซึ่ง Faizal HM et al. [7] ได้ศึกษาพบว่าปริมาณสารระเหยจะลดลง เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพิ่มขึ้นซึ่งเหมือนกับผลการทดลองที่ได้ โดยผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอร์รีแฟคชันจะมีปริมาณสารระเหยในช่วง 49.53 – 87.94% คาร์บอนคงตัวเป็นสารประกอบของคาร์บอนที่ไม่รวมเถ้า เมื่อกำจัดความชื้น และสารระเหยออกแล้ว ปริมาณคาร์บอนคงตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการทอร์รีแฟคชันเพิ่มขึ้น โดยจากผลการทดลองมีค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ระหว่าง 37.17% - 5.66% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Faizal HM et al. [7] และ Sabil KM, Aziz MA, Lal B, Uemura Y. [8] เถ้าเป็นส่วนที่ไม่ติดไฟซึ่งจะเหลืออยู่ภายหลังจากการเผาไหม้ โดยปริมาณเถ้ามากจะส่งผลให้มีความเข้มข้นของโลหะในเชื้อเพลิงสูง ดังนั้นปริมาณเถ้ามากจะทำให้ค่าพลังงานความร้อนลดลง ปริมาณเถ้าในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 3.18% - 11.39% ค่าพลังงานความร้อนคือปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศ ค่าพลังงานความร้อนเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญมาก [9] เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่สะท้อนถึงความมีคุณภาพของการเป็นเชื้อเพลิง [10] ซึ่งจากผลการทดลองค่าพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์จะมีค่าสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 5998 Cal/g และ 4393 Cal/g ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sabil KM, Aziz MA, Lal B, Uemura Y. [8] และ Uemura Y, Omar W, Othman NA, Yusup S, Tsutsui T. [11]

เมื่อนำผลการทดลองของผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากแผนการทดลอง Plackett – Burman Design มาทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการ จะได้สมการถดถอยในเทอม Actual Factors ดังแสดงในสมการที่ (6) - (11) โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้ทำนายค่าตอบสนองที่ศึกษา ซึ่งผลที่ได้จากการทำนายเป็นดังแสดงในตารางที่ 2 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.9819, 0.8071, 0.9846, 0.9796, 0.9890 และ 0.9322 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญสามารถใช้ในการทำนายค่าการตอบสนองได้อย่างเหมาะสม [12]

ผลได้เชิงมวล (%) = 173.99 - 0.41 A - 0.16 B - 0.15 C + 1.00E-2 D - 0.13 E (6)

ความชื้น (%) = 1.94 + 4.02E-4 A + 4.75E-3 B - 6.69E-3 C + 3.68E-3 D + 0.02 E (7)

สารระเหย (%) = 140.15 - 0.267 A - 0.048 B - 0.012 C + 0.015 D - 0.096 E (8)

คาร์บอนคงตัว (%) = - 36.23 + 0.22 A + 7.23E-3 B + 0.013 C - 0.039 D + 0.12 E (9)

เถ้า (%) = - 5.87 + 0.046 A + 0.036 B + 5.75E-3 C + 0.021 D - 0.041 E (10)

ค่าความร้อน (Cal/g) = 2593.48 + 8.83 A + 7.30 B + 12.14 C + 1.14 D + 3.52 E (11)

โดยที่ A คืออุณหภูมิ B คือเวลา C คือปริมาณออกซิเจน D คืออัตราการให้ความร้อน และ E คือขนาดของทะลายปาล์ม ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ จะมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้ทำการศึกษาทดลอง

3. การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วย Plackett – Burman Design สำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ค่า p-value เพื่อประเมินความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งหากปัจจัยใดมีค่า p-value น้อยกว่า 0.0500 (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองที่ศึกษา [13-14] ได้แก่ ผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อน ซึ่งผลที่ได้เป็นดังแสดงในตารางที่ 3 โดยผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลได้เชิงมวล ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อน อีกทั้งเวลาสำหรับการทอร์รีแฟคชันก็มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อน ซึ่งปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณออกซิเจน อัตราการให้ความร้อน และขนาดของทะลายปาล์มไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองของกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์ม

3.2 การวิเคราะห์ perturbation

การวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ต่อค่าตอบสนองในกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ perturbation plot ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deviation กับค่าตอบสนองในกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์ม เพื่ออธิบายผลของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งการสร้างกราฟชนิดนี้จะทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงเท่านั้น ในขณะที่ปัจจัยอื่น ๆ จะถูกกำหนดไว้ที่ค่ากลาง เพื่อเปรียบเทียบผลของปัจจัยต่าง ๆ ในช่วงที่ทำการศึกษา โดยความชันของกราฟจะเป็นตัวกำหนดความมีนัยสำคัญของตัวแปรนั้น ๆ ต่อค่าตอบสนอง กล่าวคือ ถ้าตัวแปรใดมีเส้นกราฟที่ชันมากก็จะมีผลต่อค่าตอบสนองมาก และถ้าตัวแปรใดมีเส้นกราฟความชันต่ำก็จะมีผลต่อค่าตอบสนองน้อยเช่นกัน [15-16] ซึ่ง perturbation plot ของผลตอบสนองต่าง ๆ เป็นดังแสดงในภาพที่ 3(ก) - 3(ฉ) นอกจากนี้การวิเคราะห์ลำดับความมีนัยสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ จะพิจารณาความชันของกราฟควบคู่กับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยหน้าตัวแปรนั้น ๆ ซึ่งความชันของเส้นกราฟที่ได้จะสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการในรูปของ coded factors ดังแสดงในสมการ (12) - (17) โดยค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรใดมีค่าสูงสุด ตัวแปรนั้นจะมีนัยสำคัญสูงสุดต่อค่าตอบสนอง และลำดับความมีนัยสำคัญของตัวแปรอื่น ๆ จะลดลงตามค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรนั้น ๆ ผลการศึกษาพบว่าลำดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ของผลได้เชิงมวล ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อน เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยคืออุณหภูมิ เวลา ปริมาณออกซิเจน อัตราการให้ความร้อน และขนาดของทะลายปาล์ม ตามลำดับ และปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุด และน้อยที่สุดต่อปริมาณความชื้นคือ เวลา และอุณหภูมิ ส่วนปริมาณสารระเหยจะได้รับผลจากอุณหภูมิมากที่สุด และขนาดของทะลายปาล์มน้อยที่สุด

ผลได้เชิงมวล (%) = 64.41 - 8.66 A - 1.56 B - 0.61 C + 0.053 D - 0.23 E (12)

ความชื้น (%) = 2.28 + 8.446E-3 A + 0.045 B - 0.028 C + 0.019 D + 0.029 E (13)

สารระเหย (%) = 71.82 - 5.60 A - 0.45 B - 0.052 C + 0.077 D - 0.16 E (14)

คาร์บอนคงตัว (%) = 19.07 + 4.62 A + 0.068 B + 0.056 C - 0.21 D + 0.20 E (15)

เถ้า (%) = 6.83 + 0.97 A + 0.34 B + 0.024 C + 0.11 D - 0.069 E (16)

ค่าความร้อน (Cal/g) = 5163.32 + 185.55 A + 69.06 B + 51.05 C + 5.99 D + 5.92 E (17)

3.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องทางสถิติ (Diagnostics) ของสมการการถดถอย

3.3.1 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ (Normal probability plot of the residuals)

การกระจายตัวของเศษเหลือสามารถแสดงได้โดยแผนภาพการแจกแจงแบบปกติของเศษเหลือ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเหมาะสมของการกระจายข้อมูล ซึ่งจากภาพที่ 4(ก) – 4(ฉ) แสดงการกระจายตัวข้อมูลของผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าความร้อน ตามลำดับ พบว่าเศษเหลือมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าเศษเหลือจากการทดลองของกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มไม่แสดงความผิดปกติของข้อมูล จึงสรุปได้ว่าค่าเศษเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ

3.3.2 การทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

การทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือกับค่าที่ได้จากการทำนาย เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน จากการศึกษากระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์ม จะเห็นว่าการกระจาย (scatter plot) ระหว่างค่า regression standardized residual บนแกน Y กับค่า regression predicted value บนแกน X ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) – 5(ฉ) มีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบและกระจายรอบเส้นกึ่งกลางศูนย์ หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าส่วนตกค้าง (residue) ของผลการทดลองของกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

3.3.3 การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรสุ่มและมีความอิสระต่อกัน

การทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแปรสุ่มและมีความอิสระต่อกันใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (residue) โดยใช้แผนภูมิการกระจายเพื่อสังเกตลักษณะการกระจายของข้อมูลว่ามีรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 6(ก) – 6(ฉ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า regression standardized residual บนแกน Y และค่า run number บนแกน X ของผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าความร้อน ตามลำดับ พบว่าจุดบนกราฟมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบเส้นกึ่งกลางศูนย์และไม่มีลักษณะแนวโน้มหรือมีรูปแบบอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้าง (residue) ของผลการทดลองสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ อีกทั้งค่า standard residue อยู่ในช่วง ±3 ซึ่งค่านี้บ่งบอกว่าสมการที่ได้มีความเหมาะสมเนื่องจากไม่มีความผิดปกติของข้อมูล

3.3.4 ความถูกต้องของข้อมูล

ความถูกต้องของข้อมูลสามารถแสดงได้โดยการเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าจากการทำนาย ดังแสดงในภาพที่ 7(ก) – 7(ฉ) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (Actual vs. Predicted) ของผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าความร้อน ซึ่งผลที่ได้พบว่า ค่าทำนายมีค่าใกล้เคียง และมีแนวโน้มของทิศทางสอดคล้องกับค่าจากการทดลองจริง นอกจากนี้ค่าทั้งสองยังมีการกระจายตัวเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของสมการการถดถอยที่ได้

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วย Plackett - Burman Design เพื่อคัดเลือกปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่

อุณหภูมิ เวลา สัดส่วนการป้อนออกซิเจน อัตราการให้ความร้อน และขนาดของชีวมวล ที่ส่งผลต่อผลได้เชิงมวล ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อน ซึ่งผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ จะแสดงด้วยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลา ซึ่งอุณหภูมิมีผลกระทบต่อผลได้เชิงมวล ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อนมากที่สุด ในขณะที่เวลาส่งผลกระทบต่อปริมาณความชื้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งจากการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือทางสถิติ พบว่าข้อมูลที่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงความเป็นอิสระของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง อีกทั้งสมการเชิงเส้นที่ได้สามารถใช้ในการทำนายผลของค่าตอบสนองได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ทะลายปาล์มที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันยังมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประเภททุนสร้างสถานภาพนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2560

เอกสารอ้างอิง

1. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. Potential of renewable energy [Internet]. 2017. Retrieved December, 2018, form http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html
2. Acharya B, Sule I, Dutta A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. Biomass Conversion and Biorefinery. 2012; (2): 349–369.
3. Cardona S, Gallego LJ, Valencia V, Martínez E, Rios LA. 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. 2019; (31): 17-24.
4. Gan YY, Ong HC, Ling TC, Chen W-H, Chong CT. Torrefaction of de-oiled *Jatropha* seed kernel biomass for solid fuel production. Energy. 2019; (170): 367-374.
5. Sukiran MA, Abnisa F, Daud WMAW, Bakar NA, Loh SK. A review of toreefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. Energy Conversion and Management. 2017; (149): 101-120.
6. Peng JH, Bi XT, Sokhansanj S, Lim CJ. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. Fuel. 2013; (111): 411-421.
7. Faizal HM, Shamsuddin HS, Heiree MHM, Hanaffi MFMA, Rahman MRA, Rahman MM, Latiff ZA. Torrefaction of densified mesocarp fiber and palm kernel shell. Renewable Energy. 2018; (122): 419-428.
8. Sabil KM, Aziz MA, Lal B, Uemura Y. Synthetic indicator on the severity of torrefaction of oil palm biomass residues through mass loss measurement. Applied Energy. 2013; (111): 821-826.
9. Han J, Yao X, Zhan Y, Oh SY, Kim LH, Kim HJ. A method for estimating higher heating value of biomass-plastic fuel. Energy institute. 2017; (90): 331-335.

10. Qi J, Zhao J, Xu Y, Wang Y, Han K. Segmented heating carbonization of biomass: Yields, property and estimation of heating value of chars. Energy. 2018; (144): 301-311.
11. Uemura Y, Omar W, Othman NA, Yusup S, Tsutsui T. Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. Fuel. 2013; (103): 156-160.
12. Azizi D, Gharabaghi M, Saeedi N. Optimization of the coal flotation procedure using the Plackett–Burman design methodology and kinetic analysis. Fuel Processing Technology. 2014; (128): 111-118.
13. Leea HV, Yap YHT. Optimization study of binary metal oxides catalyzed transesterification system for biodiesel production. Process Safety and Environmental Protection. 2015; (94): 430-440.
14. Mueanmas C, Nikhom R, Petchkaew A, Iewkittayakorn J, Prasertsit K. Extraction and esterification of waste coffee graounds oil as non-edible feedstock for biodiesel production. Renewable energy. Forthcoming 2018.
15. Zahid M, Shafiq N, Isa MH, Gil L. Statistical modeling and mix design optimization of fly ash based engineered geopolymer composite using response surface methodology. Cleaner Production. 2018; (194): 483-498.
16. Bimakr M, Rahman RA, FS Taip, Adzahan NM, Sarker MZI, Ganjloo A. Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Seed Oil from Winter Melon (Benincasa hispida) and Its Antioxidant Activity and Fatty Acid Composition. Molecules. 2013; (18): 997-1014.

ตารางที่ 1 ปัจจัยและค่าระดับในการออกแบบการทดลองด้วย Plackett-Burman Design

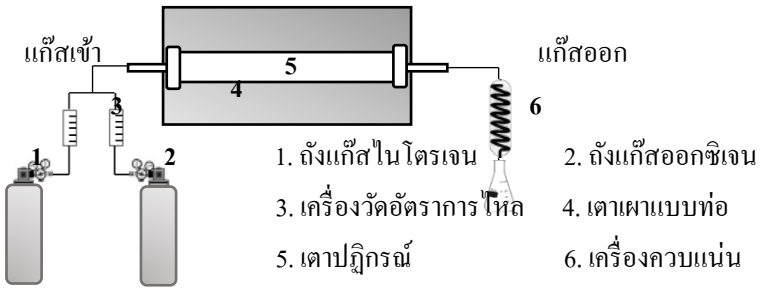
ปัจจัย	**ระดับ**	
	ค่าต่ำ (-1)	**ค่าสูง (+1)**
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) : A	200	320
เวลา (นาที) : B	5	50
ปริมาณออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์) : C	0	20
อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียส/นาที) : D	5	30
ขนาดทะลายปาล์ม (เซนติเมตร) : E	2	10

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบการทดลองสำหรับกระบวนการทอร์รีแฟคชันของทะลายปาล์มด้วยแผนการทดลอง Plackett – Burman Design

การทดลอง	A	B	C	D	E	ผลได้เชิงมวล		ความชื้น		สารระเหย		คาร์บอนคงตัว		เถ้า		ค่าพลังงานความร้อน	
						ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ	ค่าจริง	ค่าคำนวณ
1	+1	+1	-1	-1	-1	37.00	33.75	2.50	2.36	53.70	52.44	33.56	34.49	10.24	10.71	5635	5795
2	+1	+1	-1	+1	+1	30.50	32.92	2.55	2.59	49.53	52.04	36.52	34.47	11.39	10.90	5760	5852
3	-1	+1	+1	-1	+1	74.50	79.17	2.23	2.32	81.96	83.38	10.65	9.35	5.17	4.96	5226	5007
4	-1	+1	+1	+1	-1	76.50	80.50	2.25	2.27	82.01	84.51	9.64	7.41	6.09	5.81	5110	5007
5	+1	-1	+1	+1	-1	38.00	38.50	2.14	2.11	52.87	54.69	35.11	33.45	9.88	9.75	5845	5738
6	-1	-1	-1	-1	-1	89.00	90.58	2.07	2.10	86.20	86.53	7.94	7.80	3.79	3.57	4389	4408
7	+1	-1	+1	+1	+1	39.00	37.42	2.26	2.24	56.90	53.93	31.80	34.41	9.04	9.42	5666	5766
8	+1	+1	+1	-1	-1	33.50	30.83	2.17	2.23	54.54	52.19	32.54	34.76	10.76	10.83	5998	6038
9	+1	-1	-1	-1	+1	3.50	40.08	2.20	2.29	51.55	53.81	37.17	35.12	9.08	8.78	5783	5495
10	-1	+1	-1	+1	+1	87.50	82.33	2.62	2.54	86.80	83.99	5.66	8.10	4.92	5.36	4766	4793
11	-1	-1	-1	+1	-1	91.00	90.83	2.13	2.19	87.94	86.90	5.93	6.82	4.00	4.09	4448	4436
12	-1	-1	+1	-1	+1	91.50	86.58	2.23	2.10	85.93	85.52	8.67	9.02	3.18	3.36	4393	4679
R^2						0.9819		0.8071		0.9846		0.9796		0.9890		0.9322	

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยด้วยแผนการทดลอง Plackett – Burman Design

ตัวแปร	P-value					
	ผลได้เชิงมวล	ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว	เถ้า	ค่าพลังงานความร้อน
อุณหภูมิ : A	< 0.0001	0.4598	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0001
เวลา : B	0.0368	0.0128	0.2386	0.9139	0.0007	0.0392
ปริมาณออกซิเจน : C	0.3335	0.0711	0.8837	0.9427	0.6612	0.1002
อัตราการให้ความร้อน : D	0.9311	0.1829	0.8307	0.5429	0.0828	0.8273
ขนาดทะลายปาล์ม : E	0.7096	0.0638	0.6563	0.5511	0.2345	0.8292

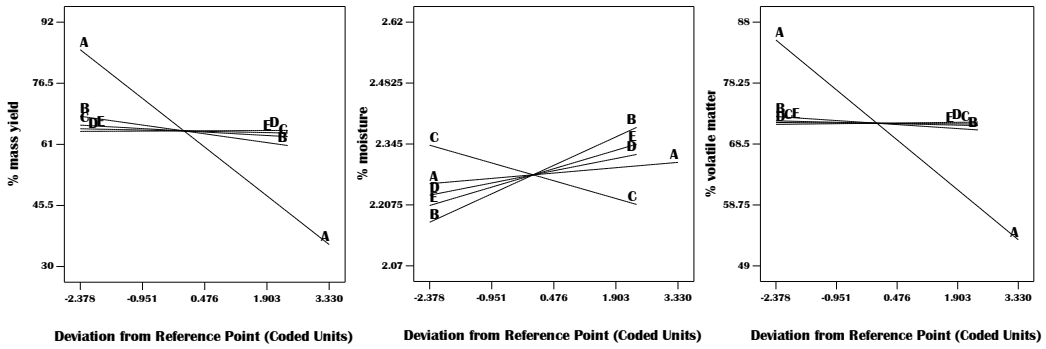


ภาพที่ 1 องค์ประกอบของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

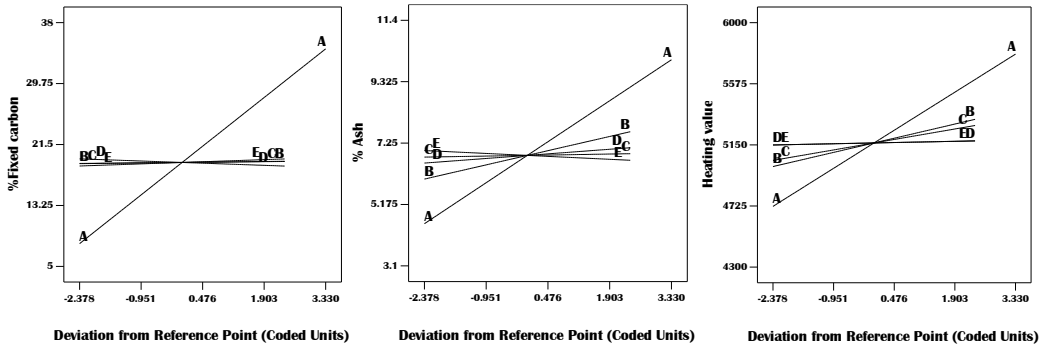


(ก) (ข)

ภาพที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) ทะลายปาล์มสด (ข) ทะลายปาล์มที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชัน

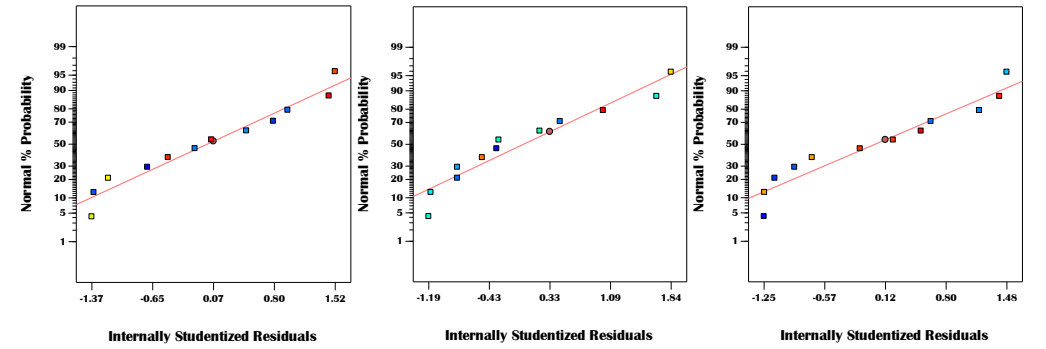


(ก) (ข) (ค)

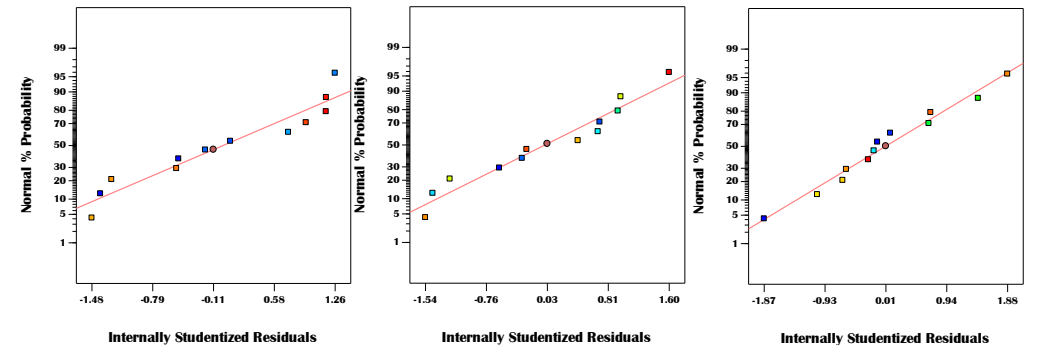


(ง) (จ) (ฉ)

ภาพที่ 3 กราฟ perturbation ของ (ก) ผลได้เชิงมวล (ข) ปริมาณความชื้น (ค) ปริมาณสารระเหย (ง) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (จ) ปริมาณเถ้า (ฉ) ค่าพลังงานความร้อน

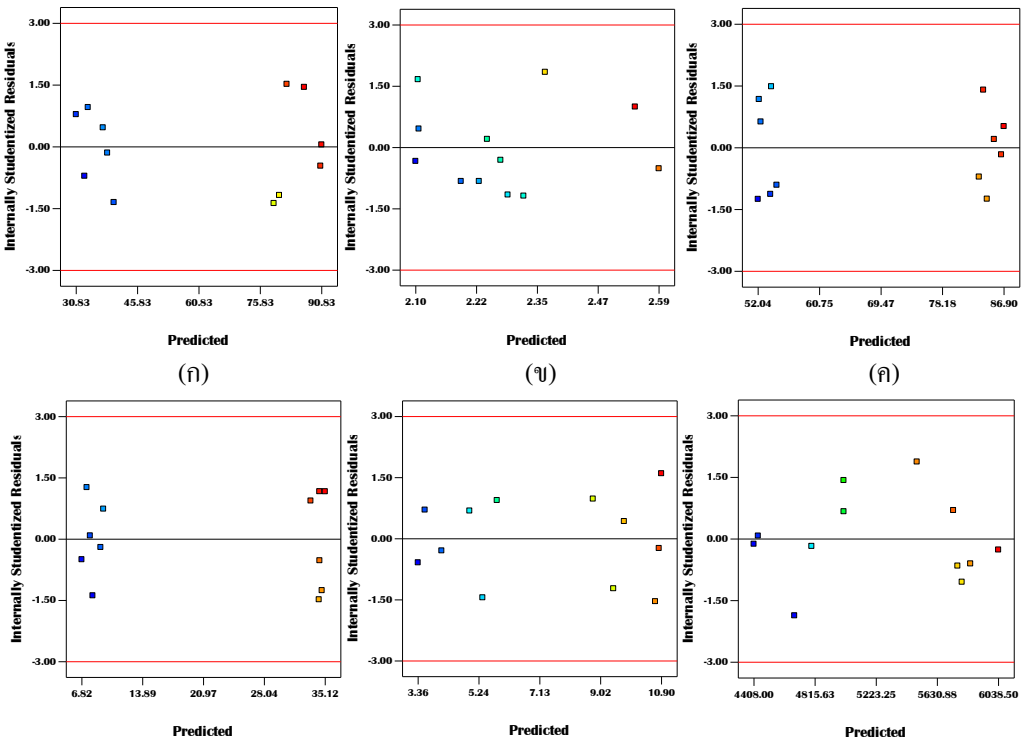


(ก) (ข) (ค)



(ง) (จ) (ฉ)

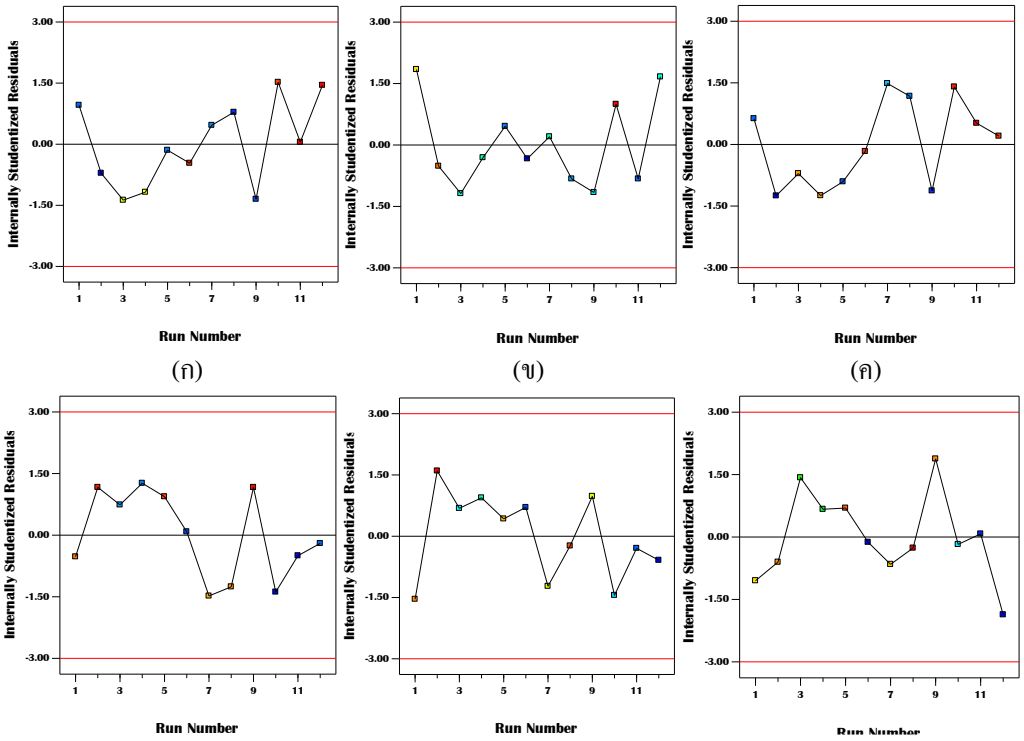
ภาพที่ 4 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของ (ก) ผลได้เชิงมวล (ข) ปริมาณความชื้น (ค) ปริมาณสารระเหย (ง) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (จ) ปริมาณเถ้า (ฉ) ค่าพลังงานความร้อน



(ก) (ข) (ค)

(ง) (จ) (ฉ)

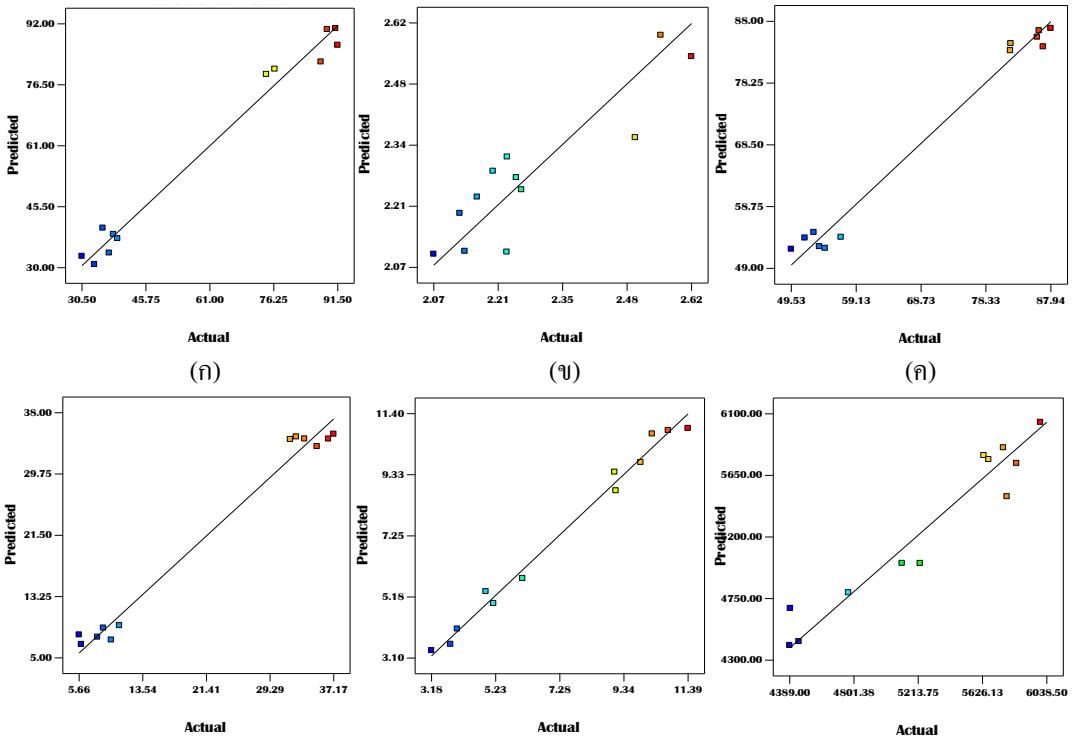
ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่เหลือและค่าที่ได้จากการทำนายของ (ก) ผลได้เชิงมวล (ข) ปริมาณความชื้น (ค) ปริมาณสารระเหย (ง) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (จ) ปริมาณเถ้า (ฉ) ค่าพลังงานความร้อน



(ก) (ข) (ค)

(ง) (จ) (ฉ)

ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่เหลือและลำดับการทดลองของ (ก) ผลได้เชิงมวล (ข) ปริมาณความชื้น (ค) ปริมาณสารระเหย (ง) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (จ) ปริมาณเถ้า (ฉ) ค่าพลังงานความร้อน



(ก) (ข) (ค)

(ง) (จ) (ฉ)

ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากการทำนาย (ก) ผลได้เชิงมวล (ข) ปริมาณความชื้น (ค) ปริมาณสารระเหย (ง) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (จ) ปริมาณเถ้า (ฉ) ค่าพลังงานความร้อน