

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Suitable Conditions for Liquid Fuel Production from Cashew Nut Shell using Hydrothermal Process without Catalyst

นิตยธินันท์ บริรักษ์* และ ชัชวาลย์ ชัยชนะ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: โทรศัพท์: 053-944-904, โทรสาร: 053-217-118

Email: Nitthinan@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว โดยการศึกษาได้ใช้ของผสมระหว่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:10 เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ให้ความร้อนที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศา/นาที และทำปฏิกิริยาภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 200 250 และ 300 °C และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 60 120 และ 180 นาที พร้อมทั้งศึกษาร้อยละของผลผลิตที่ได้ (%Yield) ค่าความร้อนสูง (HHV) ของเชื้อเพลิงเหลว และวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลว คือการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่สั้น (0 นาที) ได้ปริมาณผลผลิตเป็น เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง และ ก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ 32.33% 37.43% และ 30.24% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพเชิงพลังงาน 4.62% และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูง 40.90 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันเตา (42.10 MJ/kg) และน้ำมันดีเซล (42-46 MJ/kg)

คำหลัก: เชื้อเพลิงเหลว, เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

Abstract

This paper investigated parameters for liquid fuel production from Cashew Nut Shell (CNS) using Hydrothermal Process (HTP) without catalyst. HTP experiments were performed at 10% solid concentrations and heating rate at 4 degree/min. Parameters investigated are temperature (200, 250 and 300 °C) and retention time (0, 60, 120 and 180 min). Output from the experiments were tested for yields of products, high heating values (HHV) and energy efficiency.

It was found that HTP conversion at temperature 200 °C and the shortest retention time (0 min) produced the highest amount of liquid fuel. Output ratio of liquid fuel, solid fuel and gas and organics soluble is 32.33, 37.43 and 30.24 wt.% respectively. The energy efficiency is 4.62%. The liquid fuel obtained from the HTP has similar HHV to that of fuel oils and diesel oil with HHV of 40.90 MJ/kg compared to 42.10 MJ/kg and 42-46 MJ/kg respectively.

Keywords: Liquid fuel, Cashew Nut Shell, Hydrothermal Process

1 บทนำ

ชีวมวล [1, 2] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยสารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น พืชผลทางการเกษตร เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม้ และเศษไม้ หรือของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน ซึ่งชีวมวลจะประกอบไปด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย

แนวทางการแปลงสภาพชีวมวลเพื่อผลิตเป็นพลังงานสามารถแยกออกเป็น 2 กระบวนการ [1] คือ 1. การแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermo-chemical conversion) ได้แก่ การเผาไหม้ แก๊สซิฟิเคชัน ไพโรไลซิส และไฮโดรเทอร์มอล 2. การแปลงสภาพเชิงชีวภาพ (Bio-chemical conversion) ได้แก่ การย่อย การหมัก และการหีบแยก ทั้งนี้กระบวนการแปลงสภาพชีวมวลแต่ละกระบวนการมีเงื่อนไขและสถานะในการทำงานที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ประเภทของชีวมวล อุณหภูมิ ความดัน ตัวเร่งปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่ได้ ฯลฯ ดังนั้นการเลือกใช้แนวทางการแปลงสภาพชีวมวลให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของชีวมวลและวัตถุประสงค์การใช้งานจึงเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [3, 4] คือ กระบวนการทางเคมีและความร้อนที่ใช้ น้ำ ณ สถานะใต้จุดวิกฤต (Subcritical water) อุณหภูมิ 200 – 300 °C ความดัน 1.5 – 8 MPa และตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และเคมีของชีวมวลให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว ที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยสูงขึ้น [5, 6] ทั้งนี้รูปแบบของกระบวนการดังกล่าวจะคล้ายคลึงกับการกระบวนการเกิดน้ำมันปิโตรเลียม และถ่านหินตามธรรมชาติ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกพืชหลากหลายชนิด อาทิเช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย ปาล์มน้ำมัน ฯลฯ ซึ่งในแต่ละปีก็จะมีปริมาณ

ของเสียเหลือทิ้งจากการเกษตรเป็นอย่างมาก จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตพลังงานด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น เผาไหม้โดยตรง การหมักก๊าซชีวภาพ ฯลฯ และจากข้อมูลการสืบค้นเอกสารพบว่าในประเทศไทยได้มีการนำชีวมวล คือ ไม้ไผ่ [7, 8] และซังข้าวโพด [9] มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน เพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกับถ่านหิน สำหรับชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่มีการเพาะปลูกอยู่ภายในประเทศไทยและมีของเสียที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายคือ “เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell-CNS)” ที่ประกอบด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ส่วนคือ น้ำมัน (Cashew nut shell liquid-CNSL) และเปลือกแข็ง โดยส่วนใหญ่จะนำเปลือกที่ผ่านกระบวนการแกะเมล็ดภายในออกแล้ว จะนำไปหีบน้ำมันเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม ส่วนเปลือกที่เหลือก็จะนำไปทิ้งเป็นของเสีย หรือใช้เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ต่อไป ซึ่งการเผาไหม้จะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ [10] จากข้อมูลจำนวนครัวเรือนเกษตรกรที่ขึ้นทะเบียนการเพาะปลูกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับกรมส่งเสริมการเกษตร ปี 2554 มีจำนวนทั้งหมด 17,285 ครัวเรือน [11] และข้อมูลปี 2547 มีพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศ 210,942 ไร่ มีเนื้อที่ให้ผลแล้ว 165,278 ไร่ ผลผลิต (เปลือก + เมล็ด) 42,126 ตันต่อปี และผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 257 kg/ปี [12] คิดเป็นเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือ 25,275 ตันต่อปี (ร้อยละ 60 ของผลผลิต)

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง พร้อมทั้งศึกษาการใช้ของผสมระหว่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อน้ำบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนโดยมวล 1:10 เป็นวัตถุดิบตั้งต้นให้ความร้อนที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศา/นาที่ และทำปฏิกิริยาภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 200 250 และ 300 °C และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 60 120 และ 180 นาที ตลอดจนการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ (%Yield) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

AEC-75

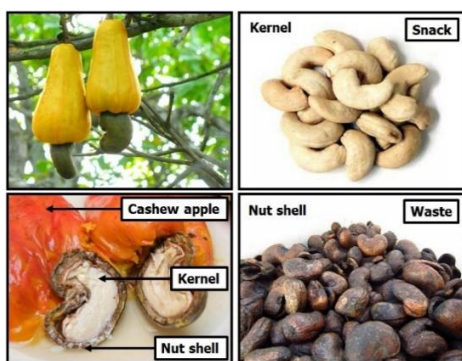
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

เหลว และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนแนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อการผลิตพลังงานทดแทนต่อไป

2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชพื้นเมืองของประเทศบราซิล มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium occidentale* linn. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae โดยที่ผลจริงของมะม่วงหิมพานต์ คือส่วนที่เรียกว่าเมล็ด ที่ติดอยู่ตรงปลายก้านดอก (รูปที่ 1) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell) มีสัดส่วนโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 55 – 65 เยื่อหุ้มเปลือก (Cashew testa) และเมล็ดใน (Cashew kernel) มีสัดส่วนโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 35 – 45 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อนำมาบดและสกัดจะได้น้ำมันเหลืองข้นสีน้ำตาลเข้ม เรียกว่า Cashew nut shell liquid (CNSL) [13] ประมาณร้อยละ 15 – 30 โดยน้ำหนัก [14] มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) ทุกชนิด เป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันได้รับความร้อนสูง บางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุนจัด กัดเยื่อจมูกและเยื่อตา [13] ในน้ำมันจะมีสารหลักๆ สองชนิดคือ กรดอนุคาร์ดิก (Anacardic acid) ประมาณร้อยละ 80 – 90 และ คาร์ดอล (Cardol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่ง อีกร้อยละ 10 – 20 นอกจากนี้ยังมีอนุพันธ์ต่างๆ ของสารหลักสองชนิดนี้อีกเล็กน้อยผสมอยู่ด้วย [15]



รูปที่ 1 รูปร่างลักษณะของมะม่วงหิมพานต์

ในการจัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบจะใช้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านกระบวนการแกะแยกเมล็ดในออกแล้ว และเมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ พบว่ามีคุณสมบัติดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 จากนั้นจึงนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผ่านกระบวนการบดย่อย และคัดแยก ให้มีขนาดไม่เกิน 5 mm โดยประมาณ พร้อมทั้งนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C ให้มีความชื้นน้อยกว่า 5% (% dry basic) และจัดเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปใช้ทดสอบในขั้นตอนต่อไป

2.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน

ไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน [4] เป็นกระบวนการที่อาศัยน้ำอุณหภูมิประมาณ 200 – 350 °C และความดัน 4 – 20 MPa บางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วยในการย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวลที่มีน้ำมันและความชื้นสูง เช่น สาหร่าย ผักตบชวา เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ฯลฯ ให้เป็นของเหลว โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายรูปแบบ และจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นของเหลวที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) หรือ เชื้อเพลิงเหลว”

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (หน่วย: % wt./wt.)

ลำดับที่	รายละเอียดการวิเคราะห์	
การวิเคราะห์แบบประมาณ		
1	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	22.98
2	ความชื้น (% dry basic)	13.48
3	สารระเหย (% dry basic)	80.84
4	คาร์บอนคงตัว	4.13
5	เถ้า	1.55
6	น้ำมัน CNSL	15-30
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ		
1	คาร์บอน (C)	61.12
2	ไฮโดรเจน (H)	8.39
3	ไนโตรเจน (N)	1.11
4	ซัลเฟอร์ (S)	1.70

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

2.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้

แนวทางในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละครั้ง จะดำเนินการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว รวมไปถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 ปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ [6, 16]

สำหรับข้อมูลปริมาณของผลิตภัณฑ์ (ของแข็งของเหลว และก๊าซ) ที่เกิดขึ้นในการทดลอง ณ เงื่อนไขต่างๆ จะนำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น โดยใช้สมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{Bio-oil (wt\%)} = \frac{W_{\text{Bio-oil}}}{W_{\text{feed}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Solid residue (wt\%)} = \frac{W_{\text{residue}}}{W_{\text{feed}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Gas (wt\%)} + \text{Organics soluble (OS) (wt\%)} = 1 - (\text{Bio-oil} + \text{Solid residue}) \text{ (wt\%)} \quad (3)$$

เมื่อ $W_{\text{Bio-oil}}$ คือ ปริมาณเชื้อเพลิงเหลว, g

W_{residue} คือ ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลาย, g

W_{feed} คือ ปริมาณวัตถุดิบตั้งต้น, g

2.3.2 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว

ในการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการทดลอง จะใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์แบบบอเดียบาติก (Adiabatic bomb calorimeter) เป็นแบบที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม สามารถควบคุมอุณหภูมิของเสื้อฉนวน (Jacket) และของถังน้ำ (Steel bucket) ให้เท่ากันตลอดเวลา ซึ่งจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างถังน้ำและน้ำขึ้น และทำให้การคำนวณหาความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างเที่ยงตรง

การคำนวณค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) (หน่วย Cal/g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{HHV} = \frac{\Delta T W - C_1 - C_2 - C_3}{m} \quad (4)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง, Cal/g

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายในการทดสอบ, °C

W คือ ค่าพลังงานเทียบเท่าของแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งได้จากการทำ Standardization โดยการเผาเชื้อเพลิงมาตรฐานในบอมบ์เพื่อ คำนวณหาค่าความจุความร้อนของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์แต่ละชุด ซึ่งในชุดอุปกรณ์จะมีค่าเท่ากับ 2,410 Cal/°C

m คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ, g

C_1 คือ ค่าแก้ (correction) จากค่าความร้อนเนื่องจากการเกิดกรดไนตริก (HNO_3) หรือ Heat of formation กรดไนตริก

C_2 คือ ค่าแก้เนื่องค่าความร้อนจากการเกิดเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือ Heat of formation ของกรดซัลฟูริก

C_3 คือ ค่าแก้ (correction) จากค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของลวดจุดระเบิด (Heat of combustion of fuse wire)

2.3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจะมีการใช้พลังงานอยู่ 2 ส่วนหลัก ซึ่งก็คือ พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์ จากนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะดำเนินการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพียงอย่างเดียว โดยสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

เหลว กับพลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในสมการที่ 5

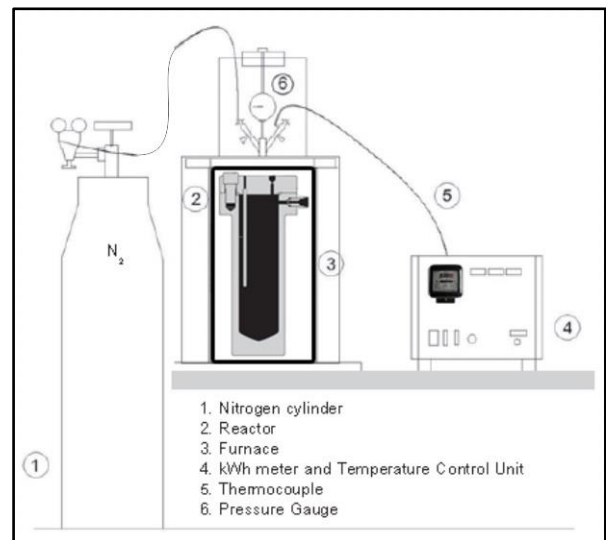
$$\text{ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน} = \frac{E_{\text{Bio-oil}}}{(E_{\text{CNS}} + E)} \quad (5)$$

- เมื่อ $E_{\text{Bio-oil}}$ คือ พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงเหลว ($W_{\text{Bio-oil}} \times \text{HHV}_{\text{Bio-oil}}$), MJ
- E_{CNS} คือ พลังงานจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งต้น ($W_{\text{CNS}} \times \text{HHV}_{\text{CNS}}$), MJ
- E คือ พลังงานที่ใช้เพื่อเพิ่มและรักษาอุณหภูมิให้กับถังปฏิกรณ์, MJ

3 อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ จะใช้ถังปฏิกรณ์แรงดันสูงขนาดปริมาตร 1 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.63 cm และความลึก 22.86 cm สร้างจากสแตนเลส 316 S.S. ที่สามารถทนอุณหภูมิ และรับแรงดันได้สูงสุด 340 °C และ 34 MPa ตามลำดับ โดยมีการติดตั้งระบบให้ความร้อนแก่ถังปฏิกรณ์ด้วยขดลวดความร้อนขนาด 3 kW พร้อมทั้งมีระบบควบคุมอุณหภูมิการทำงานจากภายในถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 และในส่วนการทดลองถังปฏิกรณ์จะถูกให้ความร้อนจากภายนอกที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 4 องศา/นาที จนกว่าอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 200 250 และ 300 °C และคงสถานะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ 0 60 120 และ 180 นาที ตามลำดับ โดยมีระเบียบขั้นตอนในการทดลองแต่ละเงื่อนไขคือ นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จากการจัดเตรียมข้างต้นมาจำนวน 20 g และน้ำกลั่นบริสุทธิ์จำนวน 200 mL ใส่ลงไปในถังปฏิกรณ์จากนั้นทำการปิดถังปฏิกรณ์และปล่อยก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่ความดัน 2.5 MPa เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ออกเป็นระยะเวลา 15 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาจึงดำเนินการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ถังปฏิกรณ์จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ต้องการ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะทำการลดอุณหภูมิถังปฏิกรณ์โดยการ

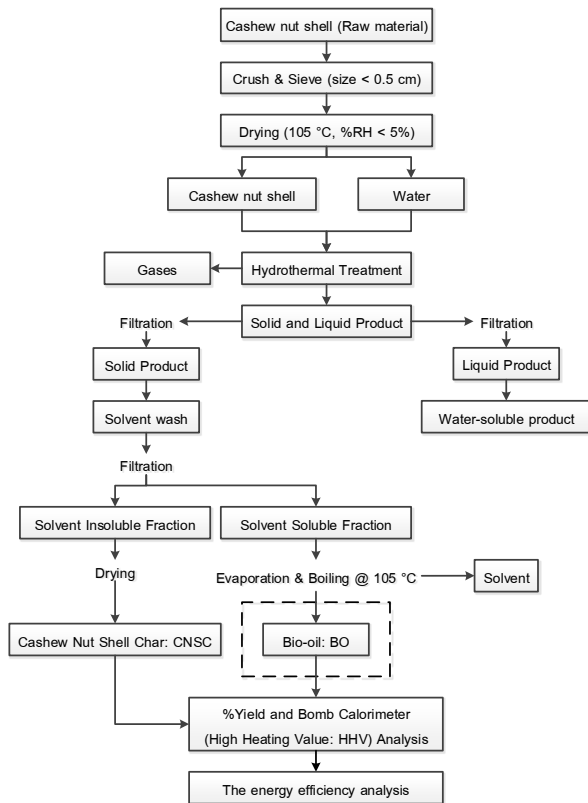
ระบายความร้อนกับอากาศตามธรรมชาติจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำของผสมที่อยู่ภายในออกมาจากถังปฏิกรณ์ เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง และของเหลว (น้ำ และสารละลายอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้) ออกจากกันด้วยกระบวนการกรอง และในขั้นตอนต่อไปจะนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งไปละลายในตัวทำละลายเอซิโตนจำนวน 200 mL จากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการกรองเพื่อแยกของแข็งและของเหลว (เอซิโตน และเชื้อเพลิงเหลว) ออกจากกัน ในส่วนของแข็งจะนำไปผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และในส่วนของเหลวจะนำไปกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C ณ ความดันบรรยากาศเพื่อแยกเอซิโตนออกจากเชื้อเพลิงเหลว จากนั้นนำเชื้อเพลิงเหลวดังกล่าวไปต้มไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 105 °C และในขั้นตอนสุดท้ายจะนำตัวอย่างทั้งหมดไปชั่งน้ำหนักพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลต่อไป ทั้งนี้จะดำเนินการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง ดังลำดับขั้นตอนการวิจัยในรูปที่ 3



รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวิจัย [4]

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

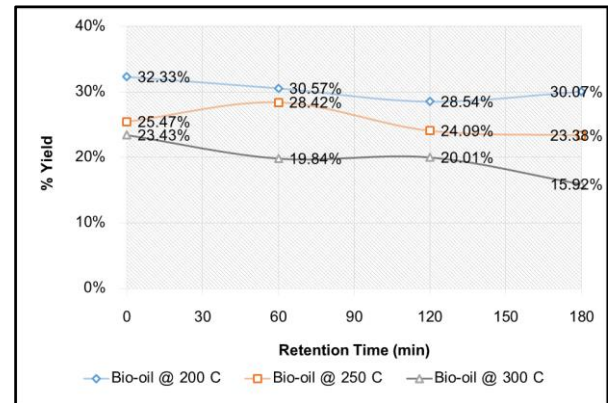
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้

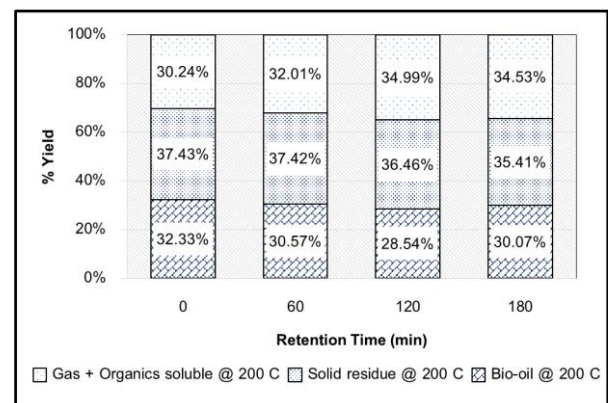
จากผลการทดลองจะพบว่าอุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา มีผลโดยตรงต่อปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจะส่งผลทำให้เกิดผลผลิตที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็งลดน้อยลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4 แต่ในทางกลับกันจะส่งผลทำให้มีสัดส่วนการเกิดก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้เพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5 และจากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า ที่เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 นาที จะได้ปริมาณเชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงแข็ง ก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ 32.33% 37.43% และ 30.24% ตามลำดับ

4.2 อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวพบว่า ที่เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที จะได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าความร้อนสูง มากที่สุด คือ 43.07 MJ/kg ส่วนการทดลองในเงื่อนไขอื่นๆ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูงที่ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงระหว่าง 38.83 – 40.90 MJ/kg ดังแสดงในรูปที่ 6



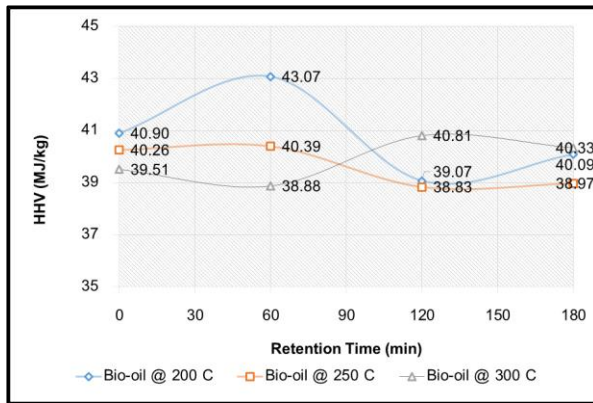
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการปฏิกิริยา กับปริมาณร้อยละของผลผลิตเชื้อเพลิงเหลวที่ได้



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำเนินการปฏิกิริยา กับปริมาณร้อยละของผลผลิตที่ได้ (เงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C)

AEC-75

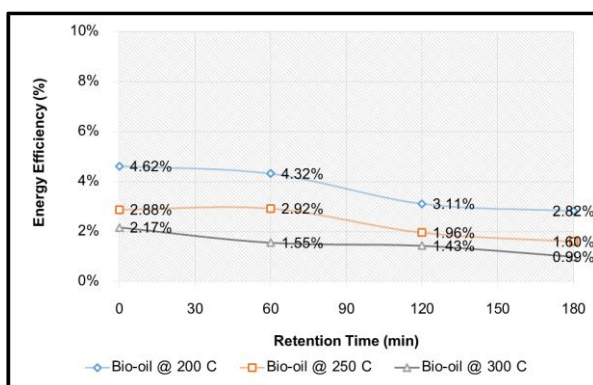
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการปฏิบัติกริยา กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว

4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเหลวข้างต้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จะมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 38.88 – 43.07 MJ/kg ซึ่งการได้มาซึ่งผลผลิตจะต้องมีการให้พลังงานตั้งแต่ถึงปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อนำมาผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงพลังงานแล้วจะพบว่า สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0 นาที จะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด คือ 4.62% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่อุณหภูมิสูง และมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดต่ำลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการปฏิบัติกริยา กับประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

5 สรุปผลการทดลอง

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่สั้น (0 นาที) ได้ปริมาณผลผลิตเป็น เชื้อเพลิงเหลวเชื้อเพลิงแข็ง ก๊าซและสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ 32.33% 37.43% และ 30.24% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพเชิงพลังงาน 4.62% และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูง 40.90 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนสูงของน้ำมันเตา (42.10 MJ/kg) และน้ำมันดีเซล (42 – 46 MJ/kg)

6 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2557) สำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย และห้องวิจัยพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร ทิพย์วงศ์ “เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล.” กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552. 256 หน้า : 1, 3-5.
- [2] [ระบบออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.eppo.go.th/eng/Load/ET08.pdf> (วันที่สืบค้นข้อมูล : 27 มกราคม 2556).
- [3] In-Hee Hwang, Hiroya Aoyama, Toshihiko Matsuto, Tatsuhiro Nakagishi, Takayuki Matsuo., "Recovery of solid fuel from municipal solid waste by hydrothermal treatment using subcritical water," Waste Management, vol. 32, pp. 410-416, Mar 2012.

AEC-75

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

- [4] Mehmet K. Akalin, Kubilay Tekin, Selhan Karagöz., "Hydrothermal liquefaction of cornelian cherry stones for bio-oil production," *Bioresource Technology*, vol. 110, pp. 682-687, 2012.
- [5] Pandji Prawisudha, Tomoaki Namioka and Kunio Yoshikawa., "Coal alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal treatment," *Applied Energy*, vol. 90, pp. 298-304, 2012.
- [6] Yixin Qu, Xiaomin Wei, Chongli Zhong., "Experimental study on the direct liquefaction of *Cunninghamia lanceolata* in water," *Energy*, vol. 28, pp. 597-606, 2003.
- [7] Daniel Schneider, Marina Escala, Kawin Supawittayayothin, Nakorn Tippayawong, "Characterization of biochar from hydrothermal carbonization of bamboo," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, Volume 2, Issue 4, 2011 pp.647-652.
- [8] Kawin Supawittayayothin and Nakorn Tippayawong., "Parametric Investigation of Biochar Production from Bamboo Using Hydrothermal Carbonization" *The International conference of the Thai Society of Agricultural Engineering 2012 April 4 – 5, 2012, Chiangmai, Thailand.*
- [9] Nakorn Worasuwannarak, Phatamaporn Potisri and Wiwut Tanthapanichakoon "Upgrading of biomass by carbonization in hot compressed water" *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 28(5) : pp. 1049-1057, 2006.
- [10] Nakorn Tippayawong, Chatchawan Chaichana, Anucha Promwangkwa, Prasert Rerkkriangkrai., "Gasification of cashew nut shells for thermal application in local food processing factory," *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, pp. 69-72, 2011.
- [11] สถิติผู้ขึ้นทะเบียนรายพืช ปี 2554, กรมส่งเสริมการเกษตร. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.survey.doae.go.th>, (วันที่สืบค้นข้อมูล : 27 มกราคม 2556).
- [12] สถิติการเพาะปลูกมะม่วงหิมพานต์ทั้งประเทศ ปี 2554, กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.survey.doae.go.th>, (วันที่สืบค้นข้อมูล : 27 มกราคม 2556).
- [13] ประเทืองศรี สินชัยศรี. 2534. "คุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีและการแปรรูปของมะม่วงหิมพานต์". *อุตสาหกรรมสาร*. 34(7) : 9-16.
- [14] Maria Lucilia dos Santos, and Gouvan C. de Magalhães., "Utilisation of Cashew Nut Shell Liquid from *Anacardium occidentale* as Starting Material for Organic Synthesis: A Novel Route to Lasiodiplodin from Cardols," *J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 10, No. 1, 13-20, 1999.
- [15] สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดภูเก็ต. 2532. "มะม่วงหิมพานต์." *อุตสาหกรรมสาร*. 32(1) : 28-29.
- [16] Shuangning Xiu, Abolghasem Shahbazi, Vestel Shirley, Dan Cheng., "Hydrothermal pyrolysis of swine manure to bio-oil: Effects of operating parameters on products yield and characterization of bio-oil," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 88, pp. 73-79, 2010.