

ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณและสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์

Influence of Pyrolysis Temperature on Yields and Properties of Bio-oil Produced from Fast Pyrolysis of *Leucaena leucocephala*

พงศ์ธร อรชร¹, สุดสาคร อินธิเดช², อติศักดิ์ ปัตติยะ^{1*}

Pongthorn Orrachorn¹, Sudsakorn Inthidech², Adisak Pattiya^{1*}

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณและสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบด อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่ทำการศึกษาคือในช่วง 400-550 °C ขนาดอนุภาคชีวมวล 0.25-0.50 mm จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เหมาะสมอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุด 65.48 wt% จากผลการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์ พบว่า ปริมาณของแข็งมีค่าเท่ากับ 0.15 wt% ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.80 ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 1.13 g/ml ค่าความร้อนสูงมีค่าเท่ากับ 20.33 MJ/kg ความหนืดมีค่าเท่ากับ 41.45 cSt และค่าดัชนีความเสถียรภาพมีค่าเท่ากับ 1.01

คำสำคัญ: ไพโรไลซิสแบบเร็ว ไม้กระถินยักษ์ ไบโอออยล์ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบด

Abstract

This paper investigates the influence of pyrolysis temperature on yields and properties of bio-oil obtained from fast pyrolysis of *Leucaena leucocephala* in a fluidised-bed reactor. Fast pyrolysis temperatures were in the range of 400-550 °C using a biomass particle size of 0.25-0.50 mm. The results showed that the optimum reaction temperature for obtaining highest bio-oil yields was around 500 °C. The highest bio-oil yields was 65.48 wt% on biomass dry basis. The bio-oil products were also tested for their basic properties. Results showed that the solids content, pH value, density, higher heating value (HHV), viscosity and stability index of the bio-oil were 0.15 wt%, 3.80, 1.13 g/ml, 20.33 MJ/kg, 41.45 cSt and 1.01, respectively.

Keywords: Fast pyrolysis, *Leucaena leucocephala*, Bio-oil, Fluidised-bed reactor

¹ นิสิตปริญญาโท ³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

* ผู้ติดต่อ: adisak_pattiya@yahoo.com, โทรศัพท์ 043-754-321 ต่อ 3036, โทรสาร 043-754-316

¹ Master Student, ³Assistant Professor, Bio-Energy and Renewable Resources Research Laboratory, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand

² Assist. Prof. Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand

* Corresponding Author: adisak_pattiya@yahoo.com, Tel.: +664 375 4321x 3036; Fax: +664 375 431

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนซึ่งเกิดจากแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gases) กำลังเพิ่มความรุนแรงขึ้น การเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลถือว่าเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าว เชื้อเพลิงฟอสซิลนอกจากจะทำให้เกิดปัญหาล้างแฉะแล้วยังเป็นพลังงานที่ไม่มีความยั่งยืนใช้แล้วมีวันที่จะหมดไปไม่สามารถหมุนเวียนมาใช้ใหม่ได้ ในศตวรรษที่ 21 พลังงานทดแทนมีแนวโน้มที่จะมีบทบาทสำคัญเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

พลังงานชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงและเป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและกำลังเป็นที่สนใจ การนำเอาพลังงานชีวมวลมาใช้นั้นจะช่วยลดปัญหาล้างแฉะที่เกิดจากการปล่อยแก๊สพิษลงได้ และในการนำเอาชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะต้องผ่านเทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวลให้เกิดประโยชน์สูงสุด กระบวนการหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจมากในขณะนี้ คือ ไพโรไลซิสแบบเร็ว ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลในรูปของแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวได้โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) และรวดเร็ว โดยปราศจากออกซิเจน ไพโรไลซิสจะถูกควบคุมอย่างรวดเร็วจนให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว เรียกว่า ไบโอดีเซล ซึ่งได้ปริมาณไบโอดีเซลสูงถึงร้อยละ 75 ของพลังงานจากชีวมวล¹

อุปกรณ์ที่เป็นหัวใจหลักของระบบไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ เตาปฏิกรณ์ (Reactor) ซึ่งเป็นส่วนที่ปฏิกิริยาการย่อยสลายขององค์ประกอบของชีวมวลด้วยความร้อนเกิดขึ้น และให้ความร้อนกับวัสดุที่ใช้ในการกระจายความร้อน ตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายโอนความร้อน (Heating medium) ส่วนมากจะนิยมใช้ทรายซิลิกา (Silica sand) ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เตาปฏิกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรเซชัน (Figure 1) ข้อดีของเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้คือ สามารถสร้างและดำเนินการได้ง่าย การควบคุมอุณหภูมิทำได้ดี การถ่ายโอนความร้อนสู่อนุภาคชีวมวลมีประสิทธิภาพสูง และสามารถขยายกำลังการผลิตได้ง่าย²

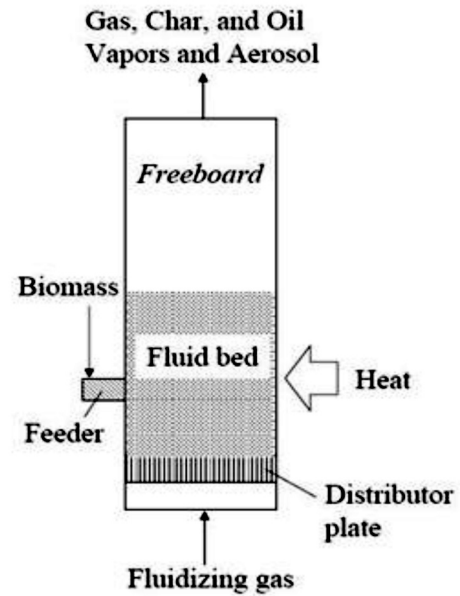


Figure 1 Fluidised-bed reactor²

กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala*) เป็นไม้โตเร็วชนิดหนึ่งที่กำลังนิยมปลูกกันมาก ข้อดีของไม้ชนิดนี้คือสามารถเจริญเติบโตคลุมพื้นที่เร็ว และไม่ต้องดูแลมากนัก ในจำพวกไม้โตเร็วกระถินยักษ์มีการรอดตายเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 91 ผลผลิต 6 ตันต่อไร่ต่อปี ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับไม้โตเร็วประเภทอื่น³ มีการปลูกมากในเขตพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาของไทย โดยทั่วไปแล้วไม้ชนิดนี้จะนำไปใช้ในการเผาไหม้โดยตรงเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนในโรงไฟฟ้า แต่ในด้านของการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลว พบว่ายังไม่มีการศึกษา ดังนั้นในงานวิจัยจึงมุ่งศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากไม้กระถินยักษ์โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซชัน วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณและสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ สมบัติของไบโอดีเซลที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณของแข็ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่น ค่าความร้อน ความหนืด และค่าบ่งชี้ความมีเสถียรภาพ และผลการศึกษานี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงพื้นฐานต่อไปได้

วิธีการทดลอง

ชีวมวล

ตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ไม้กระถินยักษ์ ซึ่งได้จากศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการอบแห้งบดย่อย และคัดแยกโดยใช้เครื่องร่อนแยกขนาดยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 digit เพื่อให้มีอนุภาค 0.25 – 0.50 มิลลิเมตร ก่อนที่จะนำชีวมวลมาทดลองจะนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C ด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นในชีวมวลให้เหลือน้อยที่สุด ตัวอย่างชีวมวลจะทำการวิเคราะห์พื้นฐาน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณเปอร์เซ็นต์ความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงที่ ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า จะทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E1756-01, ASTM E872-82, และ ASTM E1755-01 ตาม

ลำดับ ส่วนปริมาณคาร์บอนคงที่ จะคำนวณหาจากค่าความแตกต่าง ทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพ และทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Table 1 Proximate analysis of *Leucaena leucocephala*

Component (wt%)	This work	Reference ⁴
Moisture	2.50	0.63
Volatile	79.10	81.00
Ash	2.40	1.78
Fixed carbon*	18.50	16.59

*Calculated by difference

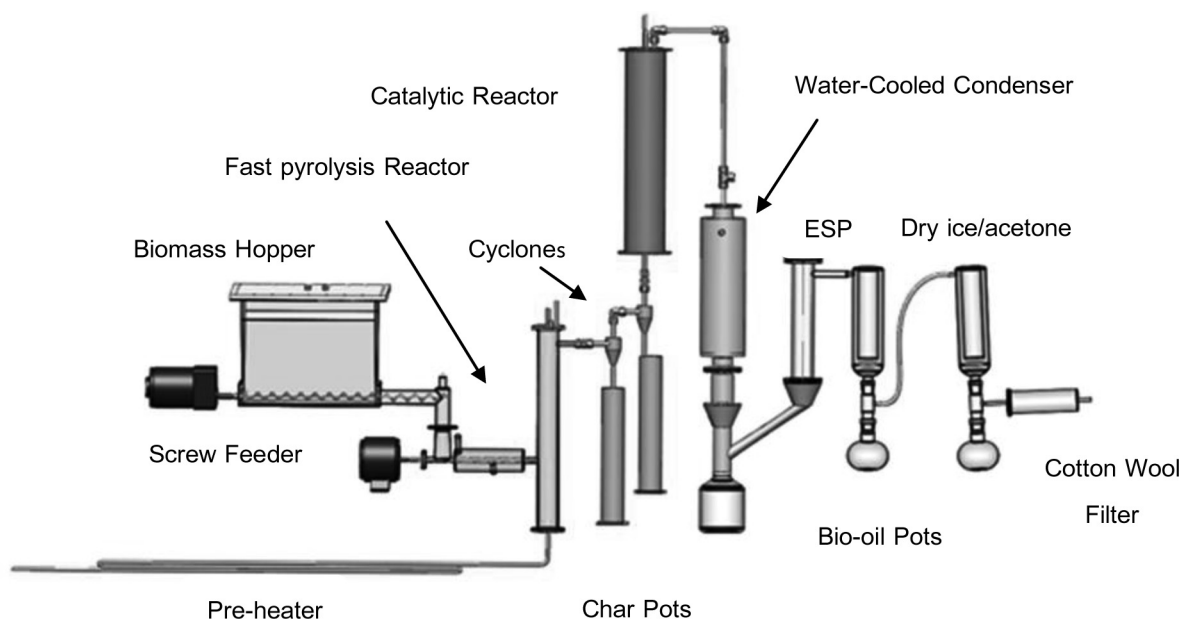


Figure 2 Schematic diagram of the fluidised-bed reactor unit

หน่วยผลิตไพโรไลซิสแบบเร็ว

หน่วยผลิตไพโรไลซิสแบบเร็วที่ใช้ในการศึกษานี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ถังบรรจุชีวมวล ชุดสกรูป้อน ชุดอุ่นไนโตรเจนร้อน เตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อน และชุดควบแน่น ดังแสดงใน Figure 2 เตาแบบปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด ทำด้วยท่อเหล็กกล้าสแตนเลส 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 50 mm ความสูง 450 mm การควบคุมอุณหภูมิในระบบจะใช้เทอร์โมคัปเปิล (Type-K)

ทำการวัดและแสดงผลโดยระบบดิจิตอล ระบบไพโรไลซิสแบบเร็วจะให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสีย ด้านล่างจะใช้แก๊สไนโตรเจนโดยอุ่นให้ร้อน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C เป็นแก๊สตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะใช้ทรายซิลิกาขนาดอนุภาค 0.25-0.50 มิลลิเมตร ชุดไซโคลนและชุดกรองไอร้อนจะทำหน้าที่ดักจับอนุภาคถ่านเพื่อให้ไพโรไลซิสสะอาดขึ้นก่อนที่ควบแน่นโดยชุดควบแน่น ซึ่งประกอบไปด้วยชุด

ควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น ชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (ESP) ชุดควบแน่นน้ำแข็งแห้งผสมกับอะซิโตน (Acetone) และสุดท้ายไอไพโรไลซิสจะผ่านชุดกรองสาส์ก่อนจะปล่อยออกสู่บรรยากาศ

การออกแบบการทดลอง

ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษานี้ คือ อุณหภูมิที่ทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิส รายละเอียดของการทดลองแสดงไว้ใน Table 2

การวิเคราะห์ไบโอออยล์

สมบัติของไบโอออยล์ที่ทำการวิเคราะห์ จะประกอบไปด้วย ปริมาณของแข็ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่น ค่าความร้อน ความหนืด ความมีเสถียรภาพ รายละเอียดของการวิเคราะห์มีดังนี้

ปริมาณของแข็ง จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องสูญญากาศดูดของเหลวผ่านกระดาษกรองเบอร์ 3 ซึ่งใช้ เอทานอลเป็นตัวทำละลายไบโอออยล์ ตัวอย่างไบโอออยล์ที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2-3 กรัม โดยก่อนการทดลองจะนำกระดาษกรองไปทำการอบเพื่อไล่ความชื้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที กระดาษกรองหลังการทดลองจะปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาสิ่งที่เหลืออยู่ในกระดาษ ซึ่งจะเป็นปริมาณของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์ ตามมาตรฐานของ ASTM D2276 ตามวิธีของ Oasmaa และ Peacocke⁵

Table 1 Pyrolysis conditions

Parameters	Experiment			
	1	2	3	4
Temperature (°C)	400	450	500	550
Particle size (mm)	0.25-0.50			
Feed rate (g/hr)	200			
Heat transfer medium	Sand silica			
Run time (minutes)	20			

ค่าความเป็นกรด-ด่าง จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวัดค่า pH (pH meter) ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยก่อนการวัดทุกครั้งจะทำการปรับเทียบค่า pH 7 และ 4 กับสารมาตรฐาน ตามลำดับ

ความหนาแน่น จะทำการวิเคราะห์โดยใช้ขวดวัดความหนาแน่นทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

ค่าความร้อน จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาค่าความร้อน (บอมบ์แคลอริมิเตอร์) มีหน่วยเป็น MJ/kg ทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์

ความหนืด เป็นการวัดความเสถียรภาพภายในของของเหลวซึ่งจะวัดความต้านทานการไหลของของเหลว ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือทดสอบความหนืดจลน์ ที่อุณหภูมิ 40°C ด้วยหลอดยี่ห้อ Cannon Instrument ขนาด 350 ตามมาตรฐาน ASTM D445 หน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt)

ตัวบ่งชี้ความเสถียรภาพ (Stability index) เป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติทางด้านความหนืดของไบโอออยล์ที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาที่เก็บรักษา โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบความหนืดจลน์ ที่อุณหภูมิ 40 °C ของไบโอออยล์ที่เก็บไว้ไม่เกิน 1 วัน (fresh) และไบโอออยล์ที่เก็บไว้นานเทียบเท่า 1 ปี (stored) (อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) มาคำนวณตามสมการที่ (1)⁷

$$\text{Stability Index} = (V_{\text{stored}} - V_{\text{fresh}}) / V_{\text{fresh}} \quad (1)$$

เมื่อ n_{fresh} = ความหนืดของไบโอออยล์เริ่มต้นวัดที่ 40 °C, cSt

n_{stored} = ความหนืดของไบโอออยล์สุดท้ายวัดที่ 40 °C, cSt

ผลการทดลองและอภิปราย

ผลของอุณหภูมิที่ทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณไบโอออยล์ที่ได้

Figure 3 แสดงผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของกระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์เบด จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุด 65.48 wt% อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเห็นว่าถ่านและแก๊สจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bidgwater⁶ ที่ศึกษาไพโรไลซิสชีวมวลประเภทไม้

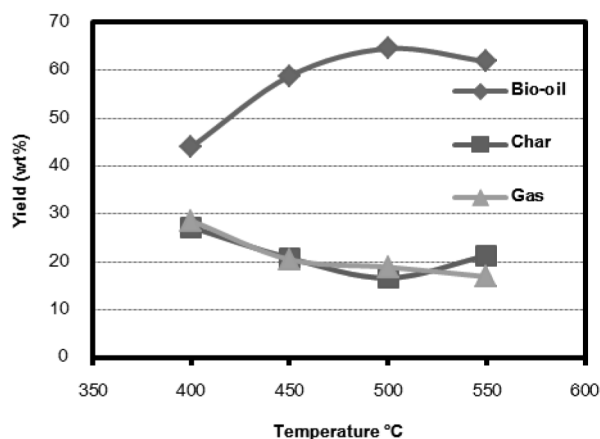


Figure 2 Effect of pyrolysis temperature on product yields

ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้

Table 3 แสดงผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้ จากผลการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์ พบว่า ปริมาณของแข็งจะอยู่ในช่วง 0.08-0.76 wt% ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 2.7-4.4 ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.13-1.19 g/ml ค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 17.4-20.3 MJ/kg ความหนืดอยู่ในช่วง 19-107 cSt ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของไบโอออยล์ที่ยอมรับได้ และตัวบ่งชี้ความมีเสถียรภาพอยู่ในช่วง 1-6.5 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Roger N. Hilten และ K.C. Das⁸ ทำการตรวจสอบจากไบโอออยล์ที่ได้จากชีวมวลไม้สนผสมกับเปลือกพื้ในในสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 500 องศาเซลเซียสได้ในเฉลี่ยในช่วง 0.25 เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าซึ่งแสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของไบโอออยล์ที่ดีกว่า

Table 2 Effect of pyrolysis temperature on bio-oil properties

Properties	Pyrolysis temperature (°C)			
	400	450	500	550
Solid content (wt%)	0.36	0.08	0.15	0.76
pH	2.70	4.40	3.80	3.80
Density (g/ml)	1.13	1.19	1.13	1.13
HHV (MJ/kg)	18.14	17.49	20.33	17.37
Viscosity (cSt)	19.02	107.3	41.45	20.48
Stability	1.31	2.77	1.01	6.55

สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการผลิตไบโอออยล์จากไม้กระถินยักษ์ โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธเบต พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุด 65.48 wt% และจากผลการวิเคราะห์ไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณของแข็งมีค่าเท่ากับ 0.15 wt% ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.80 ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 1.13 g/ml ค่าความร้อนสูงมีค่าเท่ากับ 20.33 MJ/kg ความหนืดมีค่าเท่ากับ 41.45 cSt และค่าบ่งชี้ความมีเสถียรภาพมีค่าเท่ากับ 1.01 และจากการศึกษาจะเห็นว่าสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จะสอดคล้องกับมาตรฐานของไบโอออยล์ที่ยอมรับได้ทั่วไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพ และทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ อุปกรณ์-เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Czernik S., Bridgwater A.V. Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. *Energy & Fuels*. 2004;18(2):590-8.
2. Robert C.B., Jennifer H. (2001) Fast Pyrolysis and Bio-Oil Upgrading. [online]. From: <http://www.ascensionpublishing.com/BIZ/HD50.pdf>
3. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานชีวมวล. มีนาคม 2552
4. วีระชัย อาจหาญ และคณะ (2551). การศึกษาด้านแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. เอกสารประกอบการสัมมนา ร่วมแก้วิกฤตพลังงานชาติ: ด้วยงานวิจัย วช. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 30 เมษายน ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพฯ.
5. Oasmaa A. and Peacocke C. (2010), Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids: A guide. VTT, p.134.
6. Bridgwater, A.V. (2004) Biomass Fast Pyrolysis. *Thermal Science*: Vol. 8 , No. 2, pp. 21-49
7. Oasmaa A., Elliott D.C., Müller S. Quality control in fast pyrolysis bio-oil production and use. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2009;28(3):404-9.

8. Hilten R.N., Das K.C. Comparison of three accelerated aging procedures to assess bio-oil stability. *Fuel*. 2010;89(10):2741-9.