

ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็ว
ของไม้เนื้อแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

Influence of Reaction Temperature on Yields of Bio-oil Produced from Fast
Pyrolysis of Hard Wood in a Fluidized-Bed Reactor

สุนทร สุทธิบาท¹, วราจิต พยอม², ณัฐกิตต์ แสนทอง³, สุทิน พลบูรณ์⁴ และ อติศักดิ์ ปัตติยะ^{1*}

^{1,2,3,4} สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

64 ถนนทหาร ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000

^{1*} ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

ติดต่อ: E-mail : adisak_pattiya@yahoo.com, เบอร์โทรศัพท์ : 043-754-321 ต่อ 3036, เบอร์โทรสาร : 043-754-316

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอออยล์จากขี้เลื่อยของไม้เนื้อแข็งโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณไบโอออยล์ที่ได้ จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 502°C ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดประมาณ 67.8 wt% (ฐานแห้ง) และจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของไบโอออยล์ พบว่ามีปริมาณน้ำ 19.72 wt% ปริมาณของแข็ง 0.62 wt% ปริมาณเถ้า 0.02 wt% ความหนาแน่น 1.12 g/ml ค่า pH 3.2 ค่าความร้อนต่ำ 22.43 MJ/kg (ฐานแห้ง) และความหนืดจลน์ 32.4 cSt

คำหลัก: ไพโรไลซิสแบบเร็ว, ไม้เนื้อแข็ง, ไบโอออยล์, ชีวมวล, เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

Abstract

This paper presents a study of bio-oil production via fast pyrolysis of hard wood sawdust in a fluidized-bed reactor. The purpose of this work is to investigate the influence of pyrolysis temperature on product yields. Results showed that the optimum pyrolysis temperature for obtaining highest bio-oil yields was around 502°C. The highest bio-oil yields was 67.8 wt% on biomass dry basis. The bio-oil products were also tested for their basic properties. Results showed that the water, solids and ash contents of the bio-oil were 19.72 wt%, 0.62 wt% and 0.02 wt%, respectively. Moreover, the density, pH value, lower heating value (LHV) and the viscosity of the bio-oil were 1.12 g/ml, 3.2, 22.43 MJ/kg and 32.4 cSt, respectively.

Keywords: Fast pyrolysis, Hard wood, Bio-oil, Biomass, Fluidized-bed reactor

1. บทนำ

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่สำคัญของโลก และกำลังเป็นที่สนใจอย่างมากสำหรับการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งมีปริมาณจำกัดและมีวันที่จะหมดลง ชีวมวลเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีปริมาณกำมะถัน ไนโตรเจน และเถ้า ที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งเป็นมลพิษกับสิ่งแวดล้อม แหล่งพลังงานชีวมวลจะประกอบไปด้วยวัตถุดิบจากหลายแหล่ง เช่น ไม้และวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ วัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกรรม มูลสัตว์ และกากอาหาร เป็นต้น ในการนำเอาชีวมวลเหล่านี้ไปใช้เป็นพลังงานจะต้องอาศัยเทคโนโลยีในการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส

เทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เป็นวิธีการดั้งเดิมสำหรับการเปลี่ยนรูปชีวมวล ผลผลิตที่ได้ คือ ความร้อน ซึ่งวิธีนี้จะมีปัญหาด้านมลพิษและปริมาณเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ การผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (Gasification) เป็นการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง (700°C ขึ้นไป) ซึ่งถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ ผลผลิตหลักที่ได้ คือ เชื้อเพลิงแก๊ส และไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยความร้อนสูงและรวดเร็ว (ประมาณ $400-500^\circ\text{C}$) โดยไม่ใช้ออกซิเจน ผลผลิตหลักที่ได้ คือ เชื้อเพลิงเหลว ที่เรียกว่า ไบโอบีโอยล์ (Bio-oil) [1] สำหรับเทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยความร้อนที่กำลังได้รับความสนใจมากในขณะนี้ คือ ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ให้ผลผลิตหลักเป็นของเหลว สามารถเก็บรักษาและขนส่งได้สะดวก

เชื้อเพลิงเหลว หรือไบโอบีโอยล์ (Bio-oil) ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน การผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือให้ทั้งความร้อนและผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกันได้ ที่ผ่านมานักวิจัยไพโรไลซิสแบบเร็วจากไม้และวัสดุเหลือทิ้งจากไม้มีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่าง ๆ เช่น Cao และคณะ [2] ได้ศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของซันไม้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed reactor) ที่อุณหภูมิ 500°C ได้ปริมาณไบโอบีโอยล์สูงสุดประมาณ 39.7 wt% Heo และคณะ [3] ได้ศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื้อยจากไม้เฟอร์นิเจอร์เก่าในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed reactor) พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 450°C ได้ปริมาณไบโอบีโอยล์สูงสุดประมาณ 58.1 wt% Kang และคณะ [4] ได้ศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้สนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed reactor) พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 474°C ได้ปริมาณไบโอบีโอยล์สูงสุดประมาณ 67 wt% และ Jung และคณะ [5] ได้ศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้ไผ่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed reactor) พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดอยู่ระหว่าง $405-450^\circ\text{C}$ ได้ปริมาณไบโอบีโอยล์สูงสุดประมาณ 70 wt% จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าชีวมวลประเภทไม้แต่ละชนิดจะมีเงื่อนไขของอุณหภูมิไพโรไลซิสสำหรับการผลิตไบโอบีโอยล์ที่แตกต่างกัน และจะเห็นว่าปริมาณไบโอบีโอยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลประเภทไม้จะสูง เนื่องจากไม้จะมีปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) สูงกว่าชีวมวลชนิดอื่น จึงทำให้ได้ปริมาณไบโอบีโอยล์สูงกว่า สำหรับงานวิจัยไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลในประเทศไทย พบว่ายังไม่แพร่หลายมากนัก ซึ่งอาจเป็นเพราะเทคโนโลยีไพโรไลซิสแบบเร็วมีความซับซ้อน และนักวิจัยบางส่วนยังไม่เข้าใจเทคโนโลยีดังกล่าวเพียงพอ จึงทำให้การดำเนินการไม่ประสบผลสำเร็จตามที่คาดหวัง

ไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) เป็นไม้เศรษฐกิจที่มีความสำคัญของไทย ไม้เนื้อแข็งจะนำมาแปรรูปเพื่อใช้การก่อสร้างบ้านเรือน ที่อยู่อาศัย และเฟอร์นิเจอร์ วัสดุเหลือทิ้งจากไม้แปรรูป คือ ซีเลื้อย ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ให้ความร้อน แต่ในการนำไปใช้เป็นพลังงานในรูปแบบของเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำเอาวัสดุ

เหลือทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด พบว่ายังมีการศึกษาที่น้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็งโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีสเบด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของไบโอดีเซลที่ได้ ประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น ค่า pH ค่าความร้อน และความหนืด และงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับผู้สนใจจะศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลในประเทศไทยได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา จะใช้ขี้เลื่อยจากไม้เนื้อแข็ง ซึ่งได้จากโรงงานแปรรูปไม้ในจังหวัดร้อยเอ็ด โดยทำการบดย่อยและคัดแยกขนาดโดยเลือกใช้ขนาดอนุภาค 250-500 μm ก่อนการทดลองจะนำไปอบในเตาอบที่ 105°C นาน 24 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณความชื้นให้เหลือน้อยกว่า 10 wt% ความชื้นที่ต่ำจะช่วยลดปริมาณน้ำในไบโอดีเซลได้ [6] ตัวอย่างขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็งจะทำการวิเคราะห์พื้นฐาน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (Moisture) สารระเหยได้ (Volatile matter) และปริมาณเถ้า (Ash content) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM E1756-01, E872-82 และ E1755-01 ตามลำดับ สำหรับคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) จะคำนวณหาจากค่าความแตกต่าง การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุพื้นฐานในขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็ง ประกอบไปด้วย ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) กำมะถัน (Sulfur) และออกซิเจน (Oxygen) โดยทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์เครื่องมือกลางทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (CSTE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และค่าความร้อน (Heating value) จะใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมาคำนวณหาค่าความร้อนสูง (HHV) และค่าความร้อนต่ำ (LHV) โดยพื้นฐานแบบแห้งตั้งสมการที่ (1) และ (2) สำหรับคุณลักษณะของขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็งจะแสดงไว้ในตารางที่ 1

ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) ของชีวมวลจะคำนวณโดยใช้สมการของ Sheng and Azevedo [7] ดังนี้

$$HHV_{dry} (MJ/kg) = -1.3675 + 0.3137C + 0.7009H + 0.0318O^* \quad (1)$$

เมื่อ C และ H คือ เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน และไฮโดรเจน (ฐานแห้ง) ตามลำดับ และ O^* คือ $100 - C - H - \text{Ash}$

ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) ของชีวมวลจะคำนวณจาก HHV_{dry} และปริมาณไฮโดรเจนโดยใช้สมการของ ECN [8] ดังนี้

$$LHV_{dry} (MJ/kg) = HHV_{dry} - 2.442 \times 8.936 \left(\frac{H}{100} \right) \quad (2)$$



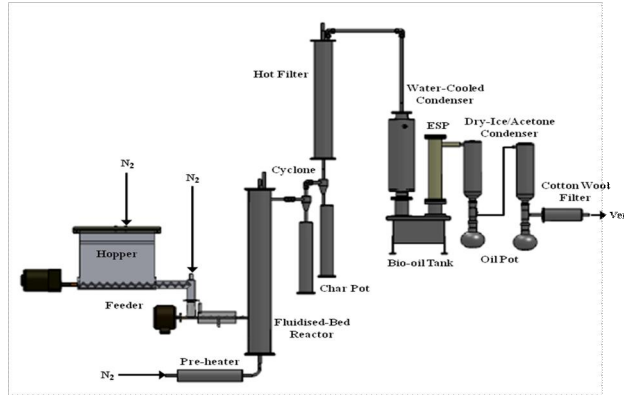
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของซีลี้อยไม้เนื้อแข็ง

การวิเคราะห์	ซีลี้อยไม้เนื้อแข็ง
<i>การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt%)</i>	
ความชื้น (ฐานเปียก)	7.82
สารระเหยได้ (ฐานแห้ง)	84.67
คาร์บอนคงตัว* (ฐานแห้ง)	14.09
เถ้า (ฐานแห้ง)	1.24
<i>การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt%, ฐานแห้งและไม่คิดเถ้า)</i>	
คาร์บอน	48.95
ไฮโดรเจน	6.72
ไนโตรเจน	0.75
กำมะถัน	0.05
ออกซิเจน*	43.52
อัตราส่วน H/C	1.65
อัตราส่วน O/C	0.67
สูตรโมเลกุล	CH _{1.65} O _{0.67}
<i>ค่าความร้อน (MJ/kg, ฐานแห้ง)</i>	
ค่าความร้อนสูง (HHV)	19.82
ค่าความร้อนต่ำ (LHV)	18.37

*คำนวณจากค่าความแตกต่าง

2.2. อุปกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเร็ว

ไฟโรไลซิสแบบเร็วของซีลี้อยไม้เนื้อแข็งจะดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชเบต ซึ่งทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบไปด้วย ชุดป้อนชีวมวล ชุดอุ่นไนโตรเจน ชุดแยกถ่านชาร์ ชุดควบแน่นและเก็บรวบรวมไบโอออยล์ ไดอะแกรมของอุปกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเร็วจะแสดงไว้ในรูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชเบตจะทำจากท่อเหล็กกล้าสแตนเลสเกรด 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 50 mm ความสูง 450 mm อนุภาคชีวมวลจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บชีวมวล (Hopper) แบบปิดและลำเลียงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยระบบป้อนแบบสกรูสองชั้น ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นทางเข้าของแก๊สไนโตรเจน ซึ่งอุ่นให้ร้อน (ไม่ต่ำกว่า 400°C) ทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวกลางในการแพร่กระจายความร้อน ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนสู่อนุภาคของชีวมวล การวัดอุณหภูมิในระบบจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K-type ตรวจวัดและแสดงผลเป็นระบบดิจิทัล อนุภาคของถ่านชาร์จะถูกดักจับโดยไซโคลอน (Cyclone) 2 ตัว และอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่ไซโคลอนไม่สามารถดักจับได้จะถูกดักจับอีกครั้งด้วยชุดกรองไอร้อน (Hot filter) ก่อนที่ทำการควบแน่นด้วยชุดควบแน่นและเก็บรวบรวมไบโอออยล์ ซึ่งชุดควบแน่นจะประกอบไปด้วย ชุดควบแน่นน้ำหล่อเย็น (Water-cooled condenser) เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแรงดันสูง (Electrostatic precipitator, ESP) และชุดควบแน่นน้ำแข็งแห้งผสมอะซิโตน (Dry-ice / Acetone condenser) แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอกโดยผ่านกรองสำลี (Cotton wool filter)



รูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็ง

2.3. การออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขการทดลองไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็ง ตัวแปรหลักที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส ซึ่งมีทั้งหมด 5 การทดลอง ในแต่ละการทดลองจะใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปร	การทดลอง				
	1	2	3	4	5
อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)	399	451	502	548	596
ขนาดอนุภาคชีวมวล (µm)	250-500				
อัตราป้อนชีวมวล (g/hr)	300				
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนร้อน (L/min)	7				

2.4. สมดุลมวล

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของเหลว (ไบโอออยล์) ส่วนที่เป็นของแข็ง (ถ่านชาร์) ส่วนที่เป็นแก๊ส (แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้) ซึ่งทั้งหมดจะได้รับการทำสมดุลมวล (Mass balance) ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำการคำนวณหาจากการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังทดลองของอุปกรณ์ในระบบไพโรไลซิสแบบเร็วทุกส่วน ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็ง ทรายซิลิกา เครื่องปฏิกรณ์ ไสโคลน กรองไอร้อน และชุดควบแน่นและเก็บรวบรวมไบโอออยล์ ซึ่งไบโอออยล์ทั้งหมดจะได้จากชุดควบแน่นน้ำหล่อเย็น เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ชุดควบแน่นน้ำแข็งแห้งผสมอะซิโตน ถังเก็บรวบรวมไบโอออยล์ทุกชุด และกรองสำลี ถ่านชาร์ทั้งหมดจะได้จากเครื่องปฏิกรณ์ ไสโคลน 2 ตัว กรองไอร้อน ท่อลำเลียงไอปิโรไลซิส และปริมาณของแข็งในไบโอออยล์ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะคำนวณหาจากค่าความแตกต่าง

2.5. การวิเคราะห์ไบโอออยล์

ตัวอย่างไบโอออยล์ที่ทำการวิเคราะห์จะเลือกจากการทดลองที่ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุด คุณสมบัติของไบโอออยล์ที่ทำการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณถ่าน ความหนาแน่น ค่า pH ค่าความร้อน และความหนืด โดยทุกรายการวิเคราะห์จะทำการทดลอง 3 ครั้ง

2.5.1. องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน

องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน (Elemental composition) ในไบโอออยล์เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุพื้นฐานที่อยู่ในไบโอออยล์ ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจน โดยใช้เทคนิคเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างชีวมวล

2.5.2. ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำ (Water content) ในไบโอออยล์จะทำการวิเคราะห์หาโดยใช้เทคนิค Karl-Fischer titration

2.5.3. ปริมาณของแข็ง

ปริมาณของแข็ง (Solids content) ในไบโอออยล์จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการกรองด้วยสุญญากาศ (Vacuum filtration technique) ดูดของเหลวผ่านกระดาษกรอง ตัวอย่างไบโอออยล์ที่ใช้ในการทดลองประมาณ 2-3 กรัม ละลายผ่านกระดาษกรองโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำละลาย ส่วนที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองได้จะเป็นปริมาณของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์ โดยก่อนทำการทดลองจะทำการอบกระดาษกรองเพื่อไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C นานประมาณ 30 นาที และทำการชั่งน้ำหนัก และหลังการทดลองกระดาษกรองจะปล่อยให้เย็นประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C นานประมาณ 30 นาที และทำการชั่งน้ำหนัก ความแตกต่างที่ได้จะเป็นปริมาณของแข็งในไบโอออยล์ การวิเคราะห์นี้จะทำตามวิธีมาตรฐานของ Oasmaa and Peacocke [9]

2.5.4. ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้า (Ash content) ในไบโอออยล์จะเป็นการวัดสิ่งที่เหลืออยู่จากการนำไบโอออยล์ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 775°C นาน 24 ชั่วโมง โดยเริ่มต้นอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C นานประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 775°C [9,10]

2.5.5. ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (Density) ของไบโอออยล์จะทำการหาโดยใช้ขวดวัดความหนาแน่นทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

2.5.6. ค่า pH

ค่า pH (pH value) ของไบโอออยล์จะทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดค่า pH (pH meter) ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการปรับเทียบที่ค่า pH 4 และ 7 กับของเหลวมาตรฐานก่อนการวัดทุกครั้ง

2.5.7. ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) ของไบโอออยล์จะทำการคำนวณหาโดยใช้ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐานของไบโอออยล์ ค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์โดยพื้นฐานแบบแห้ง (HHV_{dry}) จะทำการคำนวณหาโดยใช้สมการของ Channiwala and Parikh [11] ดังสมการที่ (3) ค่าความร้อนต่ำของไบโอออยล์โดยพื้นฐานแบบแห้ง (LHV_{dry}) จะทำการคำนวณหาตามสมการที่ (2) [8] สำหรับการคำนวณโดยพื้นฐานแบบเปียก ค่าความร้อนสูง (HHV_{wet}) และค่าความร้อนต่ำ (LHV_{wet}) จะคำนวณหาตามสมการที่ (4) และ (5) [8] โดยนำข้อมูลของปริมาณน้ำในไบโอออยล์มาใช้ในการคำนวณ

$$HHV_{dry} (MJ/kg) = 0.3491C + 1.1738H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211A \quad (3)$$

เมื่อ C, H, S, O, N และ A ในสมการที่ (3) คือ เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน และเถ้าในไบโอออยล์ (ฐานแห้ง)



$$HHV_{wet} (MJ / kg) = HHV_{dry} \left(1 - \frac{H_2O}{100} \right) \tag{4}$$

$$LHV_{wet} (MJ / kg) = LHV_{dry} \left(1 - \frac{H_2O}{100} \right) - 2.442 \left(\frac{H_2O}{100} \right) \tag{5}$$

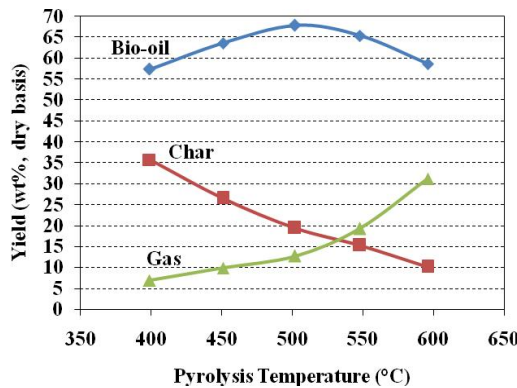
2.5.8. ความหนืด

ความหนืด (Viscosity) ของไบโอบอยล์จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือทดสอบความหนืด (Cannon-Fenske Routine Viscometer) ที่อุณหภูมิ 40°C ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D445 หน่วยของความหนืดไบโอบอยล์จะเป็น mm²/s (cSt)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้

รูปที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื้อยไม้เนื้อแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด จากผลการทดลอง พบว่าอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 502°C ได้ปริมาณไบโอบอยล์สูงสุดประมาณ 67.8 wt% (ฐานแห้ง) จากผลการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์ลดลง ในทางตรงกันข้ามปริมาณแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ปริมาณถ่านชาร์ที่ลดลง เนื่องมาจากที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำการย่อยสลายองค์ประกอบที่เป็นลิกนินได้ดี ซึ่งลิกนินจะเป็นส่วนที่ทำให้ได้ถ่านชาร์ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้ได้ถ่านชาร์ลดลง ส่วนปริมาณแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่สูงขึ้น เนื่องมาจากที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลในกระบวนการที่สอง (Secondary cracking) เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นและปริมาณไบโอบอยล์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Heo และคณะ [3] ที่ทำการทดลองไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื้อยจากไม้เฟอร์นิเจอร์เก่าในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด



รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื้อยไม้เนื้อแข็ง

3.2. ผลการวิเคราะห์ไบโอบอยล์

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอบอยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื้อยไม้เนื้อแข็ง ประกอบด้วย องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น ค่า pH ค่าความร้อน



ความหนืด และความมีเสถียรภาพ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน พบว่าไบโอออยล์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 60 wt% ปริมาณไนโตรเจนและกำมะถันในไบโอออยล์จะมีค่าต่ำมาก ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของไบโอออยล์ อัตราส่วน H/C และ O/C มีค่าเท่ากับ 1.1 และ 0.44 ตามลำดับ ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไบโอออยล์จะมีค่าประมาณ 19.72 wt% และ 0.62 wt% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั่วไปของไบโอออยล์ที่ยอมรับได้ [12] ปริมาณเถ้าในไบโอออยล์จะมีค่าต่ำประมาณ 0.02 wt% เนื่องจากหน่วยผลิตไพโรไลซิสแบบเร็วที่ใช้ในการทดลองได้ใช้หน่วยกรองไอร้อนเพื่อตัดจับอนุภาคของถ่านชาร์ที่มีขนาดเล็กไว้ได้ จึงทำให้ไพโรไลซิสมีความบริสุทธิ์ขึ้น ความหนาแน่นและค่า pH ของไบโอออยล์มีค่าประมาณ 1.12 g/ml และ 3.2 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับไบโอออยล์ทั่วไป ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของไบโอออยล์มีค่าประมาณ 22.43 MJ/kg (ฐานแห้ง) และความหนืดจลน์มีค่าประมาณ 32.4 cSt

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็ง

การวิเคราะห์	ขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็ง
อุณหภูมิไพโรไลซิส	502 °C
องค์ประกอบแร่ธาตุพื้นฐาน (wt%, ฐานแห้ง)	
คาร์บอน	59.62
ไฮโดรเจน	5.44
ไนโตรเจน	0.26
กำมะถัน	<0.01
ออกซิเจน*	34.66
อัตราส่วน H/C	1.10
อัตราส่วน O/C	0.44
สูตรโมเลกุล	CH _{1.10} O _{0.44}
ปริมาณน้ำ (wt%)	19.72
ปริมาณของแข็ง (wt%)	0.62
ปริมาณเถ้า (wt%)	0.02
ความหนาแน่น (g/ml)	1.12
ค่า pH	3.20
ค่าความร้อน (MJ/kg)	
ค่าความร้อนสูง (HHV, ฐานแห้ง)	23.62
ค่าความร้อนสูง (HHV, ฐานเปียก)	18.96
ค่าความร้อนต่ำ (LHV, ฐานแห้ง)	22.43
ค่าความร้อนต่ำ (LHV, ฐานเปียก)	17.52
ความหนืดจลน์ ที่ 40 °C (cSt)	32.40

*คำนวณจากค่าความแตกต่าง

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการผลิตไบโอออยล์จากขี้เลื่อยไม้เนื้อแข็งโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้ปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 502 °C ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดประมาณ 67.8 wt% (ฐานแห้ง) อุณหภูมิไพโรไลซิสที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์ลดลง ในทางตรงกันข้ามปริมาณแก๊สที่ไม่



สามารถควบแน่นได้จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น และจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของไบโอออยล์ พบว่ามีปริมาณน้ำ 19.72 wt% ปริมาณของแข็ง 0.62 wt% ปริมาณเถ้า 0.02 wt% ความหนาแน่น 1.12 g/ml ค่า pH 3.2 ค่าความร้อนต่ำ 22.43 MJ/kg (ฐานแห้ง) และความหนืดจลน์ 32.4 cSt และจากผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับผู้สนใจจะศึกษาไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลในประเทศไทยได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (EPPO) กระทรวงพลังงาน ห้องปฏิบัติการพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และห้องปฏิบัติการศูนย์กลางทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (CSTE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับใช้ทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bridgwater, A.V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, *Biomass and Bioenergy*, vol. 38(0), March 2011, pp. 68-94.
- [2] Cao, J.P., Xiao, X.B., Zhang, S.Y., Zhao, X.Y., Sato, K., Ogawa, Y., Wei, X.Y. and Takarada, T. (2011). Preparation and characterization of bio-oils from internally circulating fluidized-bed pyrolyses of municipal, livestock, and wood waste, *Bioresource Technol*, vol. 102(2), September 2010, pp. 2009-2015.
- [3] Heo, H.S., Park, H.J., Park, Y.-K., Ryu, C., Suh, D.J., Suh, Y.-W., Yim, J.-H. and Kim, S.-S. (2010). Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed, *Bioresource Technology*, vol. 101(1), June 2009, pp. S91-S96.
- [4] Kang, B.S., Lee, K.H., Park, H.J., Park, Y.K. and Kim, J.S. (2006). Fast pyrolysis of radiata pine in a bench scale plant with a fluidized bed: Influence of a char separation system and reaction conditions on the production of bio-oil, *J Anal Appl Pyrol*, vol. 76(1-2), August 2005, pp. 32-37.
- [5] Jung, S.H., Kang, B.S. and Kim, J.S. (2008). Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system, *J Anal Appl Pyrol*, vol. 82(2), April 2008, pp. 240-247.
- [6] Asadullah, M., Anisur Rahman, M., Mohsin Ali, M., Abdul Motin, M., Borhanus Sultan, M., Robiul Alam, M. and Sahidue Rahman, M. (2008). Jute stick pyrolysis for bio-oil production in fluidized bed reactor, *Bioresource Technol*, vol. 99(1), January 2007, pp.44-50.
- [7] Sheng, C.D. and Azevedo, J.L.T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass Bioenerg*, vol. 28(5), November 2004, pp. 499-507.
- [8] ECN. (2012). Phyllis, database for biomass and waste, Energy research Centre of the Netherlands. Energy research Centre of the Netherlands [database on the internet], Energy research Centre of the Netherlands. URL: <http://www.ecn.nl/phyllis>, access on 2/03/2012.



- [9] Oasmaa, A. and Peacocke, C. (2010). Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids: A guide, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo 2010. p. 134.
- [10] Lu, Q., Li, W.-Z. and Zhu, X.-F. (2009). Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils, *Energy Conversion and Management*, vol. 50(5), February 2009, pp. 1376-1383.
- [11] Channiwala, S.A. and Parikh, P.P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels, *Fuel*, vol. 81(8), August 2001, pp. 1051-1063.
- [12] Oasmaa, A., Elliott, D.C. and Muller, S. (2009). Quality control in fast pyrolysis bio-oil production and use, *Environ Prog Sustain*, vol. 28(3), August 2009, pp. 404-409.