

ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ

Effects of Biomass Feeding Rates on Yields of Pyrolysis Products of Fast Pyrolysis in a Free-Fall Reactor

บุญสิริ ปิตดาแสง¹, สิทธา สุขกสิ², อติศักดิ์ ปัตติยะ^{3*}

Boonsiri Pidtasang¹, Sitttha Sukkasi², Adisak Pattiya^{3*}

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของอัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ต่อปริมาณและสมบัติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ และใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ จากการทดลองพบว่า อัตราการป้อนชีวมวลที่ 1.29 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดเป็นร้อยละ 66.69 โดยน้ำหนักชีวมวล ถ่านร้อยละ 22.90 และแก๊สร้อยละ 10.41 ค่าพลังงานความร้อนสูง และค่าพลังงานความร้อนต่ำของไบโอออยล์เท่ากับ 17.33 และ 16.21 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนชีวมวลที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์และสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้ต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: อัตราการป้อน, เตาปฏิกรณ์, ตกอิสระ, ไพโรไลซิสแบบเร็ว, ไบโอออยล์

Abstract

This research aims at studying the effects of biomass feeding rates on yields and properties of products from the fast pyrolysis process in a free fall reactor. The biomass used was eucalyptus bark. The results showed that at the biomass feed rate of 1.29 g/min, the maximum bio-oil yield of 66.69wt% was obtained, together with 22.90wt% char and 10.41wt% gas yields. The bio-oil has HHV and LHV of 17.33 and 16.21 MJ/kg, respectively. The results also showed that the biomass feeding rate clearly affected the product distribution and the properties of bio-oil obtained from fast pyrolysis.

Keywords: Feeding rate, Reactor, Free-Fall, Fast Pyrolysis, Bio-oil

¹ นิสิตปริญญาเอก, ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียนคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียงอำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากสารอันตราย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

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

¹ PhD Student, ²Assistant Professor, Bio-Energy and Renewable Resources Research Laboratory, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kamriang, Kantharawichai, MahaSarakhm 44150, Thailand

² Researcher, National Metal and Materials Technology Center, 114 Thailand Science Park, Phahonyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani, 12120, Thailand

* Corresponding Author: adisak_pattiya@yahoo.com, Tel.: +664 375 4321x 3036; Fax: +664 375 4316

บทนำ

ปัจจุบันการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) หรือแก๊สเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศมีมากส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นปัญหาหลักของโลกโดยเฉพาะที่เป็นผลมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้นการหาวิธีการต่าง ๆ ในการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจึงเป็นสิ่งสำคัญในปัจจุบัน และการใช้พลังงานชีวมวลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ยั่งยืนและยังช่วยลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก

ชีวมวลในประเทศไทยส่วนใหญ่ได้มาจาก 2 ภาคส่วนคือภาคเกษตรกรรม และภาคอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว ลำต้นมันสำปะหลัง แกลบ ชี้เลื่อย ชานอ้อยและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยในปัจจุบัน เป็นไม้โตเร็วชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษอย่างแพร่หลาย โดยเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ ในปี พ.ศ.2553 มีอัตราการใช้ไม้ยูคาลิปตัสประมาณมากกว่า 6.5 ล้านตัน และในกรรมวิธีการผลิตเยื่อกระดาษ จะมีการแยกส่วนประกอบจำพวกเปลือกไม้ ที่ไม่สามารถใช้เป็นเยื่อกระดาษได้ออกประมาณร้อยละ 25 หรือ 1.625 ล้านตัน ซึ่งเปลือกไม้เหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันชีวภาพหรือไบโอออยล์ได้ ด้วยกระบวนการแปรรูปชีวมวล เช่น กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) เป็นกระบวนการเคมีความร้อน โดยการให้ความร้อนกับวัสดุในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งของเหลว และแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นของแข็งนั้นเรียกว่า ถ่านไบโอ(Bio-Char) สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งได้ โดยอาจนำมาผ่านกระบวนการอัดแท่งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ส่วนของเหลวที่ได้นั้นเรียกว่า ไบโอออยล์ (Bio-oil) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เชื้อเพลิงไบโอออยล์ที่ได้สามารถมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเตา ทั้งนี้ ก็ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบหรือชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนปริมาณของไบโอออยล์ที่ได้สามารถสูงถึงที่ร้อยละ 60-80 ของน้ำหนักชีวมวลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล⁽¹⁻³⁾ ส่วนผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จำพวกแก๊ส (Gas) ประกอบไปด้วย แก๊สตัวที่ไม่สามารถควบแน่นได้ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น แก๊สมีเทน (CH_4) ไฮโดรเจน (H_2) เอทิลีน (C_2H_4) โพรพิลีน (C_3H_6) อีเทน (C_2H_6) และโพรเพน (C_3H_8)^(2, 4, 5) เป็นต้น

เตาปฏิกรณ์ในการทำไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นส่วนที่มีความสำคัญเพราะเป็นส่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนัง

เตาเข้าสู่ชีวมวลโดยตรง ซึ่งการป้อนชีวมวลที่มากเกินไปเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะทำให้เกิดการย่อยสลายมีประสิทธิภาพต่ำซึ่งอุณหภูมิของอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ต่อการย่อยสลายจะส่งผลโดยตรงกับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอุณหภูมิการทำไพโรไลซิส^(6, 7) ระยะเวลาคงอยู่ของไอ^(8, 9) และขนาดอนุภาคของชีวมวล⁽¹⁰⁾ มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

อัตราการป้อนชีวมวล(Biomass feeding rate) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการศึกษาอัตราการป้อนชีวมวลระหว่าง 1.7-3.8 กรัมต่อนาที โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด ได้ปริมาณไบโอออยล์อยู่ในช่วงร้อยละ 55 โดยน้ำหนักชีวมวล โดยใช้ชี้เลื่อยเป็นวัตถุดิบ⁽¹¹⁾ มีการศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ (Free-fall reactor) โดยใช้อัตราการป้อนชีวมวล 1-2 กิโลกรัมต่อชั่วโมงใช้เศษไม้เป็นวัตถุดิบ ความยาวของเตาปฏิกรณ์ 1.8 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 0.21 เมตร ได้ปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 70โดยน้ำหนักชีวมวล⁽¹²⁾ อย่างไรก็ตาม ปริมาณไบโอออยล์ที่ได้ทั้งสิ้นล้วนเกิดจากหลายปัจจัยหลักที่มีส่วน ดังนั้นการศึกษาอัตราการป้อนชีวมวลที่เหมาะสมก็เป็นอีกปัจจัยทางเลือกหนึ่งที่จะใช้สำหรับเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบสร้างเครื่องไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเช่นกัน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของอัตราการป้อนชีวมวลเข้าในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้และสมบัติ โดยใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus bark) ที่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษมาเป็นวัตถุดิบ และใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ ขนาดความยาว 1.2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 0.01 เมตร เพื่อเป็นแนวทางการวิจัยพื้นฐาน และใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในงานวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การเตรียมและวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้คือเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ โดยนำมาบดย่อย และคัดแยกขนาดให้อยู่ในช่วง 212-500 ไมโครเมตรจากนั้นนำชีวมวลไปวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของชีวมวล(Proximate Analysis) และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบหลัก (Ultimate analysis) ด้วยวิธี ASTM D5291 เพื่อหาปริมาณของสารประกอบที่อยู่

ในชีวมวลดัง Table 1 จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาวัดค่าความชื้นหลังอบแล้วได้ร้อยละ 2.73 และค่าที่ได้นำมาใช้ในการคำนวณค่าพลังงานความร้อนสูง (Higher heating values, HHV) จากสมการที่ 1 และค่าพลังงานความร้อนต่ำ⁽¹³⁾ (Lower heating values, LHV) จากสมการที่ 2

$$\text{HHV} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = 0.3491\text{C} + 1.1783\text{H} + 0.1005\text{S} - 0.1034\text{O} - 0.015\text{N} - 0.0211\text{A} \quad (1)$$

$$\text{LHV}_{\text{dry}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = \text{HHV}_{\text{dry}} - 2.442 \times 8.936 \frac{\text{H}}{100} \quad (2)$$

เมื่อ C คือ ร้อยละของคาร์บอน (wt %, dry basis)
H คือ ร้อยละของไฮโดรเจน (wt %, dry basis)
S คือ ร้อยละของซัลเฟอร์ (wt %, dry basis)
O คือ ร้อยละของออกซิเจน (wt %, dry basis)
N คือ ร้อยละของไนโตรเจน (wt %, dry basis)
A คือ ร้อยละของเถ้า (wt %, dry basis)

2. อุปกรณ์การทดลองไพโรไลซิสแบบเร็ว

การทดลองไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ ดังแสดงใน Figure 1 วัสดุที่ทำเตาปฏิกรณ์ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาด 10.3 มิลลิเมตร ยาว 1.2 เมตร ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (PID controller) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Type-K) และในกระบวนการไพโรไลซิสนี้มี ระบบไซโคลน ในการแยกถ่านที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กับชุดกรองไอร้อนที่ใช้ดักจับถ่านที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งทำให้ปริมาณของแข็ง (Solids content) ที่อยู่ในไบโอออยล์ต่ำและระบบ (Electrostatic Precipitator ESP) โดยใช้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง 15-17 กิโลโวลต์ ทำให้ไอลไพโรไลซิสที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มารวมตัวกันใหม่ทำให้ได้ไบโอออยล์เพิ่มมากขึ้น และอัตราการป้อนชีวมวลเข้าเตาปฏิกรณ์ที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 6 ระดับ คือ 0.95 1.29 1.45 1.83 2.05 และ 3 กรัมต่อนาที โดยใช้อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์คงที่ 500 องศาเซลเซียส ขนาดของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 212-500 ไมโครเมตร และอุณหภูมิการควบแน่นต่ำสุดที่ -73 องศาเซลเซียส

3. วิธีการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์

การวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยได้นำไบโอออยล์ที่ได้วัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยวิธี ASTM E70 ค่าความหนาแน่นด้วยวิธี ASTM D4025 ปริมาณร้อยละของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์ด้วยวิธี ASTM D7579 ปริมาณน้ำด้วยวิธี ASTM E203

Table 1 Characteristics of biomass residues from eucalyptus bark with particle size range of 225-500 μm .

Proximate Analysis (wt %)	
Moisture	10.73
Volatile	65.72
Fixed carbon	19.37
Ash	4.18
Ultimate analysis (wt%, dry basis)	
Carbon	38.66
Hydrogen	4.50
Nitrogen	0.26
Sulfur	1.57
Oxygen*	50.83
Ash	4.18
Heating values (MJ/kg)	
HHV	14.89
LHV	13.91

*Calculated by difference.

ปริมาณร้อยละของเถ้าในไบโอออยล์ด้วยวิธี ASTM D482 ค่าความหนืดด้วยวิธี ASTM D445 และค่าเสถียรภาพของไบโอออยล์ โดยการนำไบโอออยล์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เทียบเท่ากับไบโอออยล์ที่มีอายุการเก็บนาน 1 ปี^(14, 15) และค่าพลังงานความร้อนด้วยวิธี ASTM D240

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการทดลองการทำไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ และใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีขนาดอนุภาค 212-500 ไมโครเมตร เป็นวัตถุดิบที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ 500 องศาเซลเซียส โดยทดลองอัตราการป้อนชีวมวล 6 ระดับ ได้แก่ 0.95 1.29 1.45 1.83 2.05 และ 3 กรัมต่อนาที พบว่าได้ปริมาณไบโอออยล์ในช่วงร้อยละ 39.97-66.69 โดยน้ำหนักชีวมวลปริมาณถ่านอยู่ในช่วงร้อยละ 22.90-48.53 ปริมาณแก๊สอยู่ในช่วงร้อยละ 10.41-29.71 และอัตราการป้อนชีวมวลที่ 1.29 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดร้อยละ 66.69 โดยน้ำหนักชีวมวลดังแสดงใน Figure 2 และนอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการป้อนชีวมวลที่มากกว่า 1.29 กรัมต่อนาที ได้ไบโอออยล์ในปริมาณต่ำลง และส่งผลให้ได้ถ่านเพิ่มมากขึ้น

ขึ้น เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเตาปฏิกรณ์สู่ชีวมวลมีอัตราต่ำและจากการวิเคราะห์ค่าสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 2.35-3.36 ปริมาณของแข็งที่อยู่ในช่วงร้อยละ 0.19-0.48 ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,082-1,152 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.09-0.23 ปริมาณน้ำอยู่ในช่วง 27.01-52.55 ค่าความเป็นเสถียรภาพของไบโอออยล์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.7-2.48 และนอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเป็นเสถียรภาพของไบโอออยล์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์ อัตราการป้อนชีวมวลที่เพิ่มขึ้นทำให้ไบโอออยล์มีค่าความหนืดต่ำลง ซึ่งเกิดจากไบโอออยล์มีลักษณะเป็นน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนของไบโอออยล์ที่ได้มีค่าต่ำลง⁽¹⁶⁾ ดังแสดงใน Table 2

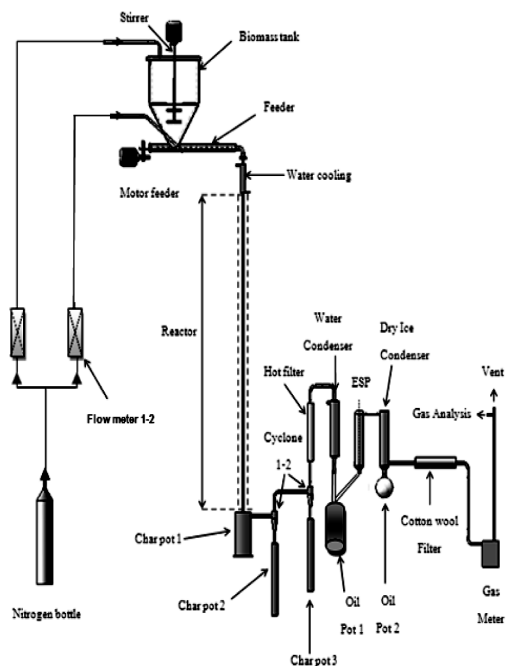


Figure 1 Schematic diagram of the free-fall fast pyrolysis unit.

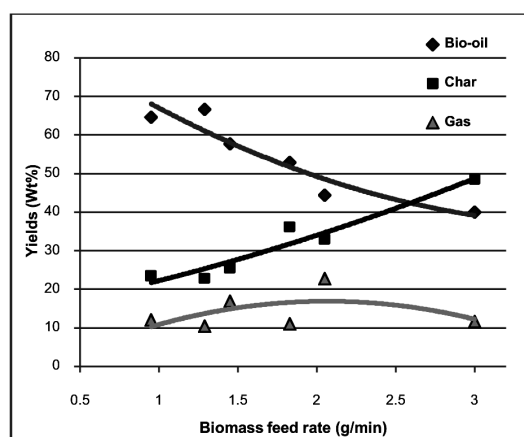


Figure2 Effects of biomass feeding rates on product yields.

Table2 Effects of biomass feeding rates on product yields and properties of bio-oil.

Analysis	Biomass feeding rate (g/min)					
	0.95	1.29	1.45	1.83	2.05	3.00
Product yields (wt%)						
Bio-oil	64.65	66.69	57.73	52.88	44.32	39.97
Char	23.39	22.90	25.46	36.20	25.98	48.53
Gas	11.96	10.41	16.80	10.92	29.71	11.50
Bio-oil properties						
pH	2.35	3.02	2.89	3.21	3.33	3.36
Density (kg/m ³)	1152	1152	1129	1106	1128	1082
Ash content (wt%)	0.23	0.18	0.17	0.16	0.15	0.09
WaterContent (wt%)	27.70	27.01	35.45	37.61	41.18	52.55
Solids Content (wt%)	0.45	0.48	0.45	0.19	0.21	0.28
Fresh bio-oil viscosity (cSt)	13.50	10.37	5.66	5.62	4.78	2.12
Aged bio-oil viscosity (cSt)	24.80	21.61	9.62	11.38	9.77	4.47
Stability	2.48	1.08	0.70	1.03	1.09	1.11
Heating value (MJ/kg)						
HHV	13.08	17.33	16.27	14.79	11.43	10.26
LHV	12.01	16.21	15.07	13.60	10.23	9.11

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการทำไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีขนาดอนุภาค 212-500 ไมโครเมตร เป็นวัตถุดิบที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ 500 องศาเซลเซียส โดยทดลองการป้อนชีวมวล 6 ระดับ ได้แก่ 0.95 1.29 1.45 1.83 2.05 และ 3 กรัมต่อนาที พบว่า อัตราการป้อนชีวมวลที่ 1.29 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดในช่วงศึกษาร้อยละ 66.69 ถ่านร้อยละ 22.90 และแก๊สร้อยละ 10.41 โดยน้ำหนักชีวมวล และนอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการป้อนชีวมวลในปริมาณมากกว่า 1.29 กรัมต่อนาที ได้ไบโอออยล์ในปริมาณต่ำลง เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเตาปฏิกรณ์สู่ชีวมวลมีอัตราต่ำ และส่งผลให้ได้ถ่านเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการป้อนชีวมวลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดไบโอออยล์ที่ไต่ลดลง และส่งผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนของไบโอออยล์ที่ได้มีค่าต่ำลง

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมภายใต้โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ภายใต้โปรแกรมเทคโนโลยีฐาน (MTEC Platform) เลขที่โครงการ MT-B-54-END-53-089-G และสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติสัญญารับทุนเลขที่ TGIST01-54-014

เอกสารอ้างอิง

1. Scott DS, Paterson L, Piskorz J, Radlein D. Pretreatment of poplar wood for fast pyrolysis: rate of cation removal. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2001;57(2):169-76.
2. Bridgwater AV. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1999;51(1-2):3-22.
3. Horne PA, Williams PT. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel*. 1996;75(9):1051-9.
4. Pattiya A, Titiloye J, Bridgwater AV. Catalytic fast pyrolysis of cassava rhizome in a micro-reactor. *Asian journal of Energy & Environment*. 2009.
5. Wiggers VR, Wisniewski A, Madureira LAS, Barros AAC, Meier HF. Biofuels from waste fish oil pyrolysis: Continuous production in a pilot plant. *Fuel*. 2009;88(11):2135-41.
6. He R, Ye XP, English BC, Satrio JA. Influence of pyrolysis condition on switchgrass bio-oil yield and physicochemical properties. *Bioresource Technology*. 2009;100(21):5305-11.
7. Liaw S-S, Wang Z, Ndegwa P, Frear C, Ha S, Li C-Z, et al. Effect of pyrolysis temperature on the yield and properties of bio-oils obtained from the auger pyrolysis of Douglas Fir wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012;93(0):52-62.
8. Mastral FJ, Esperanza E, García P, Juste M. Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2002;63(1):1-15.
9. Onwudili JA, Insura N, Williams PT. Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2009;86(2):293-303.
10. Shen J, Wang X-S, Garcia-Perez M, Mourant D, Rhodes MJ, Li C-Z. Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. *Fuel*. 2009;88(10):1810-7.
11. Park HJ, Dong J-I, Jeon J-K, Park Y-K, Yoo K-S, Kim S-S, et al. Effects of the operating parameters on the production of bio-oil in the fast pyrolysis of Japanese larch. *Chemical Engineering Journal*. 2008;143(1-3):124-32.
12. Ellens CJ, Brown RC. Optimization of a free-fall reactor for the production of fast pyrolysis bio-oil. *Bioresource Technology*. 2012;103(1):374-80.
13. Channiwala SA, Parikh PP. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*. 2002;81(8):1051-63.
14. Oasmaa A, Kuoppala E, Selin J-F, Gust S, Solantausta Y. Fast Pyrolysis of Forestry Residue and Pine. 4. Improvement of the Product Quality by Solvent Addition. *Energy & Fuels*. 2004;18(5):1578-83.
15. Oasmaa A, Leppamäki E, Koponen P, Levander J, Tapola E. Physical Characterisation of Biomass-based Pyrolysis Liquids: Application of Standard Fuel Oil Analyses. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo; 1997.
16. Meesuk S, Cao J-P, Sato K, Ogawa Y, Takarada T. The effects of temperature on product yields and composition of bio-oils in hydropyrolysis of rice husk using nickel-loaded brown coal char catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. (0).