

## ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ

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

บุญสิริ ปิตดาแสง<sup>1</sup>, สิทธา สุขกสิ<sup>2</sup>, อติศักดิ์ ปัตติยะ<sup>3\*</sup>

Boonsiri Pidasang<sup>1</sup>, Sittha Sukkasi<sup>2</sup>, Adisak Pattiya<sup>3\*</sup>

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของอัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ต่อปริมาณและสมบัติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ และใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ จากการทดลองพบว่าอัตราการป้อนชีวมวลที่ 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

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาเอก,<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียนคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียงอำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>2</sup> 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

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

<sup>2</sup> 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<sub>2</sub>) หรือแก๊สเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศมีมากส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นปัญหาหลักของโลกโดยเฉพาะที่เป็นผลมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้นการหาวิธีการต่าง ๆ ในการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจึงเป็นสิ่งสำคัญในปัจจุบัน และการใช้พลังงานชีวมวลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ยั่งยืนและยังช่วยลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก

ชีวมวลในประเทศไทยส่วนใหญ่ได้มาจาก 2 ภาคส่วนคือภาคเกษตรกรรม และภาคอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว ลำต้นมันสำปะหลัง แกลบ ชี้เลี้ยง ชานอ้อยและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

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

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) เป็นกระบวนการเคมีความร้อน โดยการให้ความร้อนกับวัสดุในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งของเหลว และแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นของแข็งนั้นเรียกว่า ถ่านไบโอ(Bio-Char) สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งได้ โดยอาจนำมาผ่านกระบวนการอัดแท่งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ส่วนของเหลวที่ได้นั้นเรียกว่า ไบโอดีเซล (Bio-oil) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ได้สามารถมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเตา ทั้งนี้ ก็ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบหรือชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนปริมาณของไบโอดีเซลที่ได้สามารถสูงถึงที่ร้อยละ 60-80 ของน้ำหนักชีวมวลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล<sup>(1-3)</sup> ส่วนผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จำพวกแก๊ส (Gas) ประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เอทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) โพรพิลีน (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) อีเทน (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) และโพรเพน (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)<sup>(2, 4, 5)</sup> เป็นต้น

เตาปฏิกรณ์ในการทำไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นส่วนที่มีความสำคัญเพราะเป็นส่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนจากผนัง

เตาเข้าสู่ชีวมวลโดยตรง ซึ่งการป้อนชีวมวลที่มากเกินไปเข้าสู่เตาปฏิกรณ์จะทำให้เกิดการย่อยสลายมีประสิทธิภาพต่ำซึ่งอุณหภูมิของอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ต่อการย่อยสลายจะส่งผลโดยตรงกับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอุณหภูมิการทำไพโรไลซิส<sup>(6, 7)</sup> ระยะเวลาคงอยู่ของไอ<sup>(8, 9)</sup> และขนาดอนุภาคของชีวมวล<sup>(10)</sup> มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

อัตราการป้อนชีวมวล(Biomass feeding rate) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีการศึกษาอัตราการป้อนชีวมวลระหว่าง 1.7-3.8 กรัมต่อนาที โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด ได้ปริมาณไบโอดีเซลอยู่ในช่วงร้อยละ 55 โดยน้ำหนักชีวมวล โดยใช้ชี้เลี้ยงเป็นวัตถุดิบ<sup>(11)</sup>มีการศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ (Free-fall reactor) โดยใช้อัตราการป้อนชีวมวล 1-2 กิโลกรัมต่อชั่วโมงใช้เศษไม้เป็นวัตถุดิบ ความยาวของเตาปฏิกรณ์ 1.8 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 0.21 เมตร ได้ปริมาณไบโอดีเซลร้อยละ 70โดยน้ำหนักชีวมวล<sup>(12)</sup>อย่างไรก็ตาม ปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ทั้งสิ้นล้วนเกิดจากหลายปัจจัยหลักที่มีส่วน ดังนั้นการศึกษาอัตราการป้อนชีวมวลที่เหมาะสมก็เป็นอีกปัจจัยทางเลือกหนึ่งที่จะใช้สำหรับเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบสร้างเครื่องไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเช่นกัน

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

## วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในงานวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

### 1. การเตรียมและวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้คือเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ โดยนำมาบดย่อย และคัดแยกขนาดให้อยู่ในช่วง212-500ไมโครเมตรจากนั้นนำชีวมวลไปวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของชีวมวล(Proximate Analysis) และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบหลัก (Ultimate analysis) ด้วยวิธี ASTM D5291เพื่อหาปริมาณของสารประกอบที่อยู่

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

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

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

- 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 มิลลิเมตรยาว 1.2 เมตร ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (PID controller) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Type-K) และในกระบวนการไพโรไลซิสนี้มี ระบบไซโคลน ในการแยกถ่านที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กับชุดกรองไอร้อนที่ใช้ดักจับถ่านที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งทำให้ปริมาณของแข็ง (Solids content) ที่อยู่ในไบโอออยล์ต่ำและระบบ (Electrostatic Precipitator ESP) โดยใช้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง 15-17 กิโลโวลต์ ทำให้ไอไพโรไลซิสที่มีขนาดอนุภาคเล็ก 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<sup>(14, 15)</sup> 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 พบว่าได้ปริมาณไบโอออยล์อยู่ในช่วงร้อยละ 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<sup>(16)</sup> ดังแสดงใน Table 2

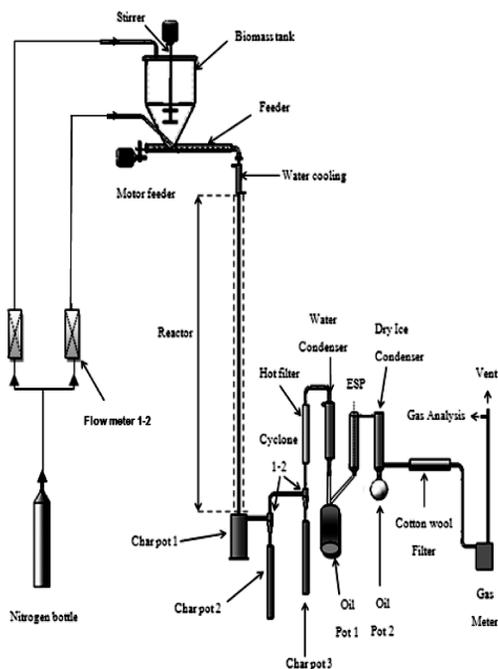


Figure 1 Schematic diagram of the free-fall fast pyrolysis unit.

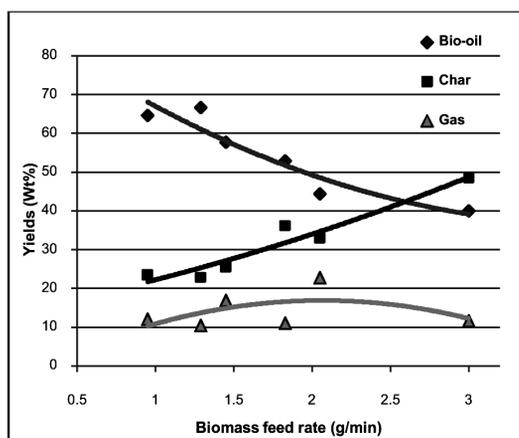


Figure2 Effects of biomass feeding rates on product yields.

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 <sup>3</sup> )  | 1152                         | 1152  | 1129  | 1106  | 1128  | 1082  |
| Ash content (wt%)             | 0.23                         | 0.18  | 0.17  | 0.16  | 0.15  | 0.09  |
| Water Content (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 ได้ปริมาณไบโอออยล์สูงสุดในช่วงศึกษา ร้อยละ 66.69 ถ่าน ร้อยละ 22.90 และแก๊ส ร้อยละ 10.41 โดยน้ำหนักชีวมวล และนอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการป้อนชีวมวลในปริมาณมากกว่า 1.29 กรัมต่อนาที ได้ไบโอออยล์ในปริมาณต่ำลง เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเตาปฏิกรณ์สู่ชีวมวลมีอัตราต่ำ และส่งผลให้ได้ถ่านเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการป้อนชีวมวลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดไบโอออยล์ที่ได้น้อยลง และส่งผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนของไบโอออยล์ที่ได้มีค่าต่ำลง

## กิตติกรรมประกาศ

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

## เอกสารอ้างอิง

- 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.
- Bridgwater AV. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1999;51(1-2):3-22.
- Horne PA, Williams PT. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel*. 1996;75(9):1051-9.
- Pattiya A, Titiloye J, Bridgwater AV. Catalytic fast pyrolysis of cassava rhizome in a micro-reactor. *Asian journal of Energy & Environment*. 2009.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Channiwala SA, Parikh PP. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*. 2002;81(8):1051-63.
- 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.
- Oasmaa A, Leppamaki 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.
- Meesuk S, Cao J-P, Sato K, Ogawa Y, Takarada T. The effects of temperature on product yields and composition of bio-oils in hydrolysis of rice husk using nickel-loaded brown coal char catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. (0).