

สมบัติของไบโอออยล์และถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของใบอ้อย

Properties of Bio-oil and Char Obtained from Fast Pyrolysis of Sugarcane Leaves

เกยูร ดวงอุปมา¹, อติศักดิ์ ปัตติยะ^{2*}

Keyoon Duanguppama¹, Adisak Pattiya^{2*}

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของไบโอออยล์และถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของใบอ้อย ทำการทดลองที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวล 150 กรัมต่อชั่วโมง และขนาดอนุภาคชีวมวล 250-425 ไมโครเมตร โดยสมบัติของไบโอออยล์ที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณของแข็ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่น ปริมาณเถ้า ค่าความร้อน และค่าความร้อนสูง สมบัติของถ่านชาร์ที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณเถ้า การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และค่าความร้อนสูง พบว่า สมบัติไบโอออยล์มีปริมาณของแข็งร้อยละ 1.50 ± 0.22 โดยน้ำหนัก ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.88 ± 0.08 ค่าความหนาแน่น 1.13 ± 0.02 กรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณเถ้าในไบโอออยล์ร้อยละ 0.04 ± 0.01 โดยน้ำหนัก ค่าความหนืด 42.99 ± 0.43 เซนติสโตก ค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์ 15.77 ± 1 เมกกะจูล ต่อ กิโลกรัม ขณะที่ถ่านชาร์มีปริมาณเถ้าร้อยละ 36.28 ± 0.47 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคถ่านชาร์ระหว่าง 0-211 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 43.05 โดยน้ำหนัก และค่าความร้อนสูงของถ่านชาร์ 14.23 ± 1 เมกกะจูลต่อ กิโลกรัม

คำสำคัญ: การไพโรไลซิสแบบเร็ว ชีวมวล ถ่านชาร์ ใบอ้อย ไบโอออยล์

Abstract

This research aims to study the properties of the bio-oil and char from fast pyrolysis of the sugar cane leaves. A fast pyrolysis experiment was conducted at a temperature of 550°C with a feed rate of 150 g/h using a biomass particle size of 250-425 µm. The properties of bio-oil studied include solids content, pH, density, ash content, viscosity and higher heating value. The properties of char include ash content, particle size distribution and higher heating value. The results showed that the bio-oil had solids content of 1.50 ± 0.22 wt%, pH of 2.88 ± 0.08 , density of 1.13 ± 0.02 g/ml, ash content of 0.04 ± 0.01 wt%, viscosity of 42.99 ± 0.43 cst and higher heating value of 15.77 ± 1 MJ/kg. The char had ash content of 36.28 ± 0.47 wt%, particle size in the range of 0-212 µm of 43.05 wt% and higher heating value 14.23 ± 1 MJ/kg.

Keywords: Fast Pyrolysis, Biomass, Char, Sugarcane leaves, Bio-oil

¹ นิสิตปริญญาเอก, ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ PhD student, ²Assistant Professor, Bio-Energy and Renewable Resources Research Laboratory, 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 4316

บทนำ

ความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมและการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ได้เกิดแรงกระตุ้นในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งวิธีการแปลงรูปเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นพลังงานการเผาไหม้โดยตรงเป็นวิธีที่พบมากที่สุด¹ เชื้อเพลิงชีวมวลและกากของเสียสามารถแปลงรูปเป็นพลังงานที่มีคุณค่ามากขึ้นโดยผ่านกระบวนการทางความร้อนทางชีวภาพและทางกลหรือทางกายภาพ² ชีวมวลสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานโดยตรงด้วยกระบวนการเผาไหม้หรืออาจจะกลายเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคโนโลยีการแปลงรูปเชื้อเพลิงชีวมวลเช่น ไพโรไลซิสแบบเร็ว³ การไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นเทคโนโลยีการแปลงรูปความร้อนทางเคมีซึ่งอุณหภูมิปฏิกิริยาที่ใช้อยู่ระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส⁴ โดยขนาดอนุภาคชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด คือ 250-425 ไมโครเมตร⁵ กระบวนการนี้สามารถแยกถ่านชาร์ของเหลว และแก๊ส ระหว่างกระบวนการเพื่อให้ได้ของเหลวไบโอออยล์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บหรือขนส่ง⁶ และถ่านชาร์ซึ่งมีสมบัติที่น่าสนใจ⁷ สมบัติของไบโอออยล์ที่ดีขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน ค่าความร้อนเชื้อเพลิง และเสถียรภาพ³

สมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของไบโอออยล์ทั้งทางด้านการเก็บรักษาและการขนส่ง รวมทั้งสมบัติของถ่านชาร์เป็นอีกตัวแปรที่บอกถึงสถานะของกระบวนการ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์และถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว

วิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ คือ ไบอัสขนาดอนุภาค 250-425 ไมโครเมตรผ่านการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วยร้อยละความชื้นตามมาตรฐาน ASTM⁸ E1756-01 ร้อยละสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM⁹ E872-82 ร้อยละเถ้าตามมาตรฐาน ASTM¹⁰ E1755-01 และร้อยละคาร์บอนคงตัวคำนวณจากความแตกต่างการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการหาร้อยละของธาตุประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 22 และ EN45014 ค่าความร้อนสูงวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Art.2060/2070 Bomb Calorimeter ตามมาตรฐาน DIN 51900 ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Properties of sugarcane leaves

Proximate Analysis (wt %)	Wet basis	Dry basis
Moisture	2.65	-
Volatile	69.18	71.07
Fixed carbon ^a	18.47	18.98
Ash	9.70	9.95
Ultimate analysis (wt%)	Wet basis	Dry basis
Carbon	41.60	41.60
Hydrogen	4.12	4.12
Nitrogen	0.36	0.36
Sulfur	0.13	0.13
Oxygen	44.09	43.84
HHV (MJ/kg)	15.90±1	16.33±1
LHV (MJ/kg)	15.00±1	15.43±1

^aFixed carbon(Wet basis)= 100 – Moisture–Volatile –Ash

^aFixed carbon(Dry basis)= 100–Volatile – Ash

^bOxygen= 100 –Carbon–Hydrogen–Nitrogen–Sulfur–Ash

2. การไพโรไลซิสแบบเร็ว

Figure 1 แสดงแผนภาพการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดโดยมีหลักการทำงานคือ ก่อนการทดลองบรรจุชีวมวลที่ผ่านการคัดขนาดลงในถังป้อนชีวมวล (Hopper) จากนั้นต่อเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด(Reactor) ชุดกรองไอร้อน (Hot filter) ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและชุดตกตะกอนไฟฟ้าสถิต(Water-cooled condenser and ESP) ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง (Dry-ice/Acetone condenser) และชุดกรองแก๊ส(Gas filter) ตามลำดับ เริ่มการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิชุดอุ่นไนโตรเจนก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ 600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส และชุดกรองไอร้อน 420 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิได้ตามกำหนดให้ป้อนไนโตรเจน N₂ เข้ากับถังป้อนชีวมวลและชุดอุ่นไนโตรเจนก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลเข้าถังป้อนชีวมวล 3 ลิตรต่อนาที และชุดอุ่นไนโตรเจน 6 ลิตรต่อนาที

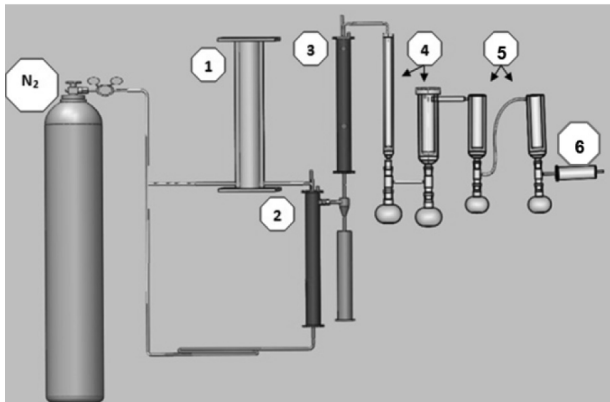


Figure 1 Schematic diagram of the fluid bed reactor fast pyrolysis unit include 1 Hopper, 2 Reactor, 3 Hot filter, 4 Water-cooled condenser and ESP, 5 Dry-ice/Acetone condenser, 6 Gas filter

3. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

ปริมาณของแข็งในไบโอออยล์ (Solids content) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D7579 ซึ่งงานวิจัยของ Oasmaa และ Peacocke 2010¹¹ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 3 ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากกระดาษกรอง จากนั้นนำกระดาษกรองที่ผ่านการอบไล่ไธแก๊วดูความชื้น พร้อมชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าที่อ่านได้ ขั้นตอนต่อไปละลายไบโอออยล์ในสารทำละลายเอทานอลแล้วเทลงบนกระดาษกรองที่ใส่ไว้ในชุดกรองขวดแก้วที่ต่อเข้ากับเครื่องสุญญากาศ เดินเครื่องเพื่อดูของเหลวที่อยู่ด้านบนกระดาษกรองจนแน่ใจว่าของเหลวถูกดูดผ่านกระดาษกรองจนหมด แล้วนำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 30 นาทีซึ่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักกระดาษกรองเริ่มต้น

ค่าความเป็นกรด-ด่างไบโอออยล์ (pH) ใช้เครื่องยี่ห้อ COMBI pH/mV/Temp Bench Meter

ค่าความหนาแน่นไบโอออยล์ (Density) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4052 ซึ่งงานวิจัยของ Oasmaa และ Peacocke 2010¹¹ อธิบายรายละเอียดดังนี้ ชั่งน้ำหนักของไบโอออยล์เทียบกับปริมาตรที่ใช้ตวง ซึ่งหน่วยที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักมีหน่วยเป็นกรัมต่อปริมาตรที่ใช้หน่วยมิลลิลิตร โดยภาชนะที่ใช้ตวงไบโอออยล์จะใช้บีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร แต่ไบโอออยล์ที่ชั่งน้ำหนักแต่ละครั้งให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 มิลลิลิตร

ปริมาณเถ้าในไบโอออยล์ (Ash content) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน DIN EN7 โดยการเผาไบโอออยล์ที่อุณหภูมิ 775 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังการเผา

ค่าความหนืดไบโอออยล์ (Viscosity) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D445 โดยวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง 26 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเครื่องวิเคราะห์ 40 องศาเซลเซียส ขนาดหลอดแก้ววิเคราะห์เบอร์ 450 = 2.5 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที, เซนติสโตกต่อวินาที ยี่ห้อแคนนอน

ค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์และถ่านชาร์ (Higher Heating value) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน DIN 51900 โดยใช้เครื่อง Art.2060/2070 Bomb calorimeter

ร้อยละปริมาณเถ้าในถ่านชาร์ (Ash content) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM¹⁰ E1755-01 โดยเผาถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังเผา

การกระจายตัวของถ่านชาร์ขนาด (Particle size distribution) วิเคราะห์โดยใช้เครื่องคัดขนาดยี่ห้อ Retesch AS 200

ผลการทดลองและอภิปราย

1. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว

Figure 2 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของไบออย ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวล 150 กรัมต่อชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วย ไบโอออยล์ถ่านชาร์ และแก๊ส

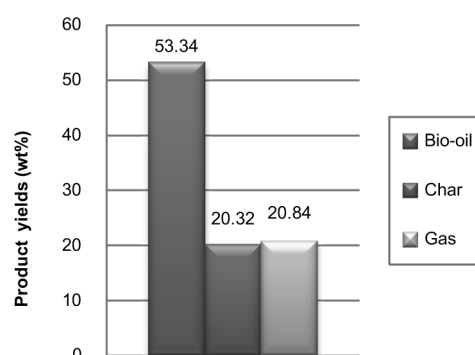


Figure 2 Product yields from fast pyrolysis

Figure 3-5 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของไบออย ดังนี้ไบโอออยล์ส่วนที่ 1 คือ ไบโอออยล์ที่ได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและไฟฟ้าสถิตส่วนที่ 2 จากชุดควบแน่นน้ำแข็งแห้ง/อะซิโตนการวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้ไบโอออยล์ส่วนที่ 1 เพื่อวิเคราะห์สมบัติ และถ่านชาร์ที่ใช้วิเคราะห์สมบัติได้จากถังเก็บด้านล่างของไซโคลน



Figure 3 Bio-oil from Water-cooled condenser and ESP



Figure 4 Bio-oil from Dry-ice/Acetone condenser



Figure 5 Char

จากผลปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Wang และคณะ 2005¹² โดยทดลองไพโรไลซิสแบบเร็ว ฟางข้าวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส พบว่า ได้ปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 33.7 โดยน้ำหนักซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในครั้งนี้ พบว่า ได้ปริมาณไบโอออยล์น้อยกว่า เนื่องจากงานวิจัยของ Wang และคณะ 2005¹² ไม่มีชุดตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

2. สมบัติของไบโอออยล์

ไบโอออยล์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วถูกนำไปวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM ดังข้อมูลแสดงใน Table 2

Table 2 Properties of Bio-oil from fast py

Analysis	Result
Solids content (wt%)	1.50±0.22
pH	2.88±0.08
Density(g/ml)	1.13±0.02
Ash content(wt%)	0.04±0.01
Viscosity (cSt)	42.99±0.43
HHV (MJ/kg)	15.77±1

จาก Table 2 เมื่อนำผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานไบโอออยล์จากตำรา เรื่อง สมบัติและการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือไพโรไลซิสแบบเร็วของ Oasmaa และ Peacocke 2010¹¹ สรุปได้ดัง Table 3

Table 3 Comparison of bio-oil properties with the standard

Analysis	This work	Standard ASTM D7544 - 10
Solids content (wt%)	1.50±0.22	<0.5
pH	2.88±0.08	2-3
Density (g/ml)	1.13±0.02	1.10-1.30
Ash content (wt%)	0.04±0.01	0.01-0.2
Viscosity (cSt)	42.99±0.43	15-35

จาก Table 3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเพราะประสิทธิภาพในการกรองของไซโคลนยังทำหน้าที่ได้ไม่ดีพอทำให้มีอนุภาคขนาดเล็กหลุดผ่านไซโคลนออกไปพร้อมกับไอไพโรไลซิสและควบแน่นที่ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและชุดตกตะกอนไฟฟ้าสถิตส่งผลให้ค่าความหนืดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานนอกจากนี้ปริมาณของแข็งในไบโอออยล์ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Lignin-derived oligomers ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และถ้าเก็บไว้ในอุณหภูมิต่ำจะเชื่อมต่อโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้นจนจับตัวรวมกันแยกตัวเป็นคราบยางเหนียว ทำให้คุณภาพและเสถียรภาพไบโอออยล์ลดลง

ค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Pattiya 2011³ ซึ่งได้ไพโรไลซิสแบบเร็วแห่งมันสำปะหลัง พบว่า มีค่าความร้อนสูง 18.97 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมซึ่งสูงกว่างานครั้งนี้ที่มีค่าความร้อนสูง 15.77 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เพราะปริมาณคาร์บอนของแห่งมันสำปะหลังสูงกว่า

3. สมบัติของถ่านชาร์

สมบัติของถ่านชาร์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว ไบโอะลัย เมื่อวิเคราะห์จะได้ปริมาณถ่าน และค่าความร้อนสูง ดัง Table 4

Table 4 Properties of char from fast pyrolysis

Analysis	Result
Ash content (wt%)	36.28±0.47
HHV(MJ/kg)	14.23

ค่าความร้อนสูงของถ่านชาร์เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Bo-Sung Kang และคณะ 2006¹³ ซึ่งได้ไพโรไลซิสแบบเร็วที่เลื่อยไม้สนด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด พบว่ามีค่าความร้อนสูงของถ่านชาร์ที่ได้จากไซโคลน 26 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่างานวิจัยครั้งนี้เพราะปริมาณคาร์บอนในถ่านชาร์ที่เลื่อยไม้สนมีมากกว่าไบโอะลัย

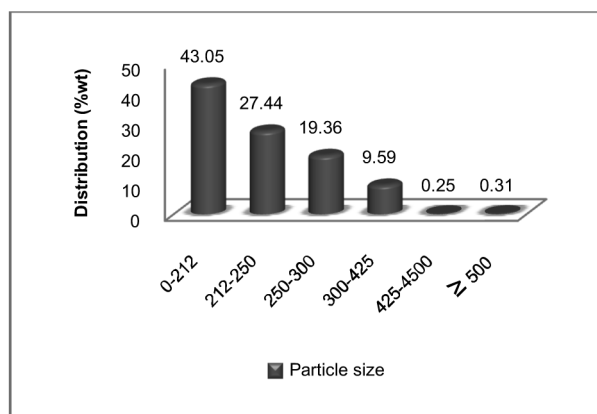


Figure 6 Particle size distribution of char

จาก Figure 6 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคถ่านชาร์ที่เกิดจากการย่อยสลายอนุภาคชีวมวลของตัวกลางถ่านไอน้ำความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ที่ย่อยสลายชีวมวลขนาดอนุภาค 250-425 ไมโครเมตร ลดลงเหลือ 0-212 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 43.05 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Bo-Sung Kang และคณะ 2006¹³ ที่ไพโรไลซิสแบบเร็วที่เลื่อยไม้สนพบว่าขนาดของถ่านชาร์จากไซโคลนมีขนาดที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยในครั้งนี้

ผลการทดลองสมบัติของไบโอะลัยและถ่านชาร์ควรมีการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนชีวมวลเพราะจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนสูง อีกทั้งเป็นการทำนายชนิดชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสแบบเร็ว

สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาสมบัติของไบโอะลัยและถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของไบโอะลัยที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 150 กรัมต่อชั่วโมง ขนาดอนุภาคชีวมวล 250 - 425 ไมโครเมตร สมบัติไบโอะลัยพบว่า ปริมาณของแข็งที่ได้สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสัมพันธ์กับค่าความหนืดที่สูงถึง 42.99±0.43 เซนติสโตก แต่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหนาแน่น และปริมาณถ่านอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สมบัติของถ่านชาร์ พบว่า ปริมาณคาร์บอนในชีวมวลส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนสูงของถ่านชาร์ และการย่อยสลายอนุภาคชีวมวลขนาด 250-425 ไมโครเมตร ลดลงเหลือ 0-212 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 43.05 โดยน้ำหนัก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตกาฬสินธุ์ที่สนับสนุนทุนวิจัย และห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Sheng C, Azevedo JLT. "Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data". Biomass and Bioenergy 2005; vol.28[5]: 499-507.
- Bridgwater AV. "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading". Biomass and Bioenergy 2011; 1-27.
- Pattiya A. "Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor". Bioresour Technology Jan2011; vol.102[2]: 1959-67.
- Effendi A, Gerhauser H, Bridgwater AV. "Production of renewable phenolic resins by thermochemical conversion of biomass: A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008; vol.12[8]: 2092-116.
- Pattiya A, Suttibak S. "Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2012; vol.95[0]: 227-35.

6. Miao X, Wu Q, Yang C. "Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2004; vol.71[2]: 855-63.
7. Hu S, Xiang J, Sun L, Xu M, Qiu J, Fu P. "Characterization of char from rapid pyrolysis of rice husk". *Fuel Processing Technology* 2008; vol.89[11]: 1096-105.
8. E1756-01. "Standard Test Method for Determination of Total Solids in biomass". ASTM 1-3.
9. E872-82. "Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels". ASTM 1-3.
10. E1755-01. "Standard Test Method for Ash in Biomass". ASTM 1-3.
11. Oasmaa A, Peacocke C. "Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids". *VTT PUBLICATIONS* 731 2010; 1-134.
12. Wang S, Fang M, Yu C, Luo Z, Cen K. "Flash pyrolysis of biomass particles in fluidized bed for bio-oil production". *China Particuology* 2005; vol.3 [1-2]: 136-40.
13. Kang BS, Lee KH, Park HJ, Park YK, Kim JS. "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". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2006; vol.76[1-2]: 32-7.