

ผลของการนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์

Influence of Product Gas Recycle on Yields and Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of *Leucaena leucocephala*

คมสัน ขันนาม¹, สุตสาคร อินธิเดช², อติศักดิ์ ปัตติยะ³

Khomson Khannam¹, Sudsakorn Inthidech², Adisak Pattiya³

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของการนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากชีวมวลไม้กระถินยักษ์ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบด ทำการทดลองในอุณหภูมิในช่วง 400-550 องศาเซลเซียส ชีวมวลที่ใช้มีอนุภาคขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สในระบบ 10.5 ลิตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์สูงที่สุดถึงร้อยละ 65.97 ขณะที่ชาร์ร้อยละ 22.27 และแก๊สที่ไม่ควบแน่นร้อยละ 11.76 โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ที่ได้มีค่าความหนาแน่น 1.2 g/ml ค่าความหนืด 7.5 cSt ค่า pH 2.4 ปริมาณของแข็ง 2.9 wt% และดัชนีเสถียรภาพ 0.62 ซึ่งการนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ทำให้ได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 56.47 เป็นร้อยละ 65.97

คำสำคัญ: การนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการไพโรไลซิส ไม้กระถินยักษ์ ไบโอออยล์

Abstract

This research aims at investigating the effect of product gas recycling on yields and properties of bio-oil derived from fast pyrolysis of *Leucaena leucocephala* in a fluidized-bed reactor at different temperatures ranging from 400°C to 550°C. The biomass particle size of 0.25-0.50 mm and gas flow rate of 10.5 L/min were chosen. The results showed that at 400°C the bio-oil yield reached its maximum at 65.97%, whereas the char and non-condensable gas were 22.27 wt% and 11.76 wt%, respectively. It was also found that the density, viscosity, pH, solids content and stability of the bio-oil were 1.2 g/ml, 7.5 cSt, 2.4, 2.9wt% and 0.62, respectively. In addition, the use of product gas recycle increased the bio-oil yield from 56.47 wt% to 65.97 wt%.

Keywords: Product Gas Recycle, fast pyrolysis, *Leucaena leucocephala*, bio-oil

¹ นิสิตปริญญาโท ³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียงอำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียงอำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

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 4316

บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาประเทศในทุก ๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ การขนส่งการผลิตไฟฟ้าและงานบริการอื่น ๆ อีกหลายประเภทแหล่งที่มาของพลังงานของโลกในปัจจุบันส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล คิดเป็นร้อยละ 80 โดยประมาณในขณะที่อีกประมาณร้อยละ 14 มาจากชีวมวลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญที่สุดในขณะนี้โดยประมาณ 3 ใน 4 ของพลังงานชีวมวลที่ใช้ในโลกใช้ในประเทศที่กำลังพัฒนาและอีก 1 ใน 4 ใช้ในประเทศที่พัฒนาแล้วในปัจจุบันได้เจริญเติบโตรวดเร็วไปมากกว่าอดีตกาลอีกทั้งยังมีการพัฒนาการทางด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ทันสมัยเกิดขึ้นมากมายที่พบเห็นกันอยู่ในทุกทวีปของโลก แต่ขณะเดียวกันนั้นสิ่งที่ใช้เป็นรากฐานในการพัฒนากับเริ่มที่จะหมดลงทุกวัน เช่น พลังงานน้ำมัน พลังงานแก๊สธรรมชาติและพลังงานถ่านหิน ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญเป็นอย่างมากในยุคสมัยใหม่ อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ภาวะโลกร้อน ฝนกรด ฯลฯ และทุกประเทศก็ประสบปัญหาในด้านต่าง ๆ เหล่านี้ โดยเฉพาะปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงที่นับวันก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ประเทศไทยต้องใช้พลังงานน้ำมันเป็นพื้นฐานหลักในการพัฒนาประเทศเพื่อเพิ่มความเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจโดยต้องนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศร้อยละ 70 ของพลังงานทั้งหมด ดังนั้นเพื่อต้องการความเจริญเติบโตและความต้องการพลังงานเพื่อช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมโดยแนวโน้มของโลกกำลังอยู่ในระหว่างเคลื่อนไปผลิตพลังงานแบบยั่งยืน¹ ดังนั้นการใช้พลังงานทดแทนจึงมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งในยุคปัจจุบัน

กระบวนการไพโรไลซิสหรือกระบวนการกลั่นสลาย (Destructive distillation) เป็นปฏิกิริยาเคมีความร้อน ด้วยการให้ความร้อนกับวัสดุในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนโดยใช้อุณหภูมิในการทำไพโรไลซิสประมาณ 500 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้ความร้อนที่สูง (>10 องศาเซลเซียสต่อวินาที) และเวลาคงอยู่ของไอสั้น (<2 วินาที) ซึ่งสามารถแปลงสภาพชีวมวลที่เป็นของแข็งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลว (Bio-Oil) ของแข็ง (Char) และแก๊ส (Gas) ซึ่งนักวิจัยหลายคนได้ทำการทดลองแล้วว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจากวัสดุชีวมวลที่มีความแตกต่างกันและระบบของเตาปฏิกรณ์ที่มีความแตกต่างกันหลาย ๆ แบบจะได้ผลผลิต (Bio-Oil) สูงถึงร้อยละ 80 ของชีวมวลที่ป้อนเข้าไป^{2,3}

ในงานวิจัยนี้เลือกเอากระถินยักษ์มาเป็นวัตถุดิบหรือชีวมวลใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเนื่องด้วยกระถิน

ยักษ์เป็นพืชพลังงานเพื่อป้อนโรงงานไฟฟ้าชีวมวลตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี มุ่งให้ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเป็นหลักของประเทศแทนการนำเข้าน้ำมัน โดยวางแผนเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็นร้อยละ 20 ของการใช้พลังงานในปี 2565 ซึ่งพลังงานทดแทนที่มีการส่งเสริมให้มีการนำมาใช้สูงสุดคือพลังงานชีวมวลจำนวน 3,700 เมกะวัตต์ ในบรรดาพืชที่ให้พลังงานชีวมวลกระถินยักษ์เป็นพืชที่น่าสนใจเพราะเป็นไม้โตเร็วใช้ระยะเวลาในการปลูก 1-2 ปี สามารถตัดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกทั้งเป็นพืชที่ไม่ต้องดูแลมากนัก ทนแล้งได้ดีตายยากสามารถปลูกได้ทุกภูมิภาค กระถินยักษ์ถือว่าเป็นพืชในตระกูลถั่วที่สามารถดัดแปลงในไตรเจนในอากาศมาใช้

ในการทดลองด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะใช้แก๊สไนโตรเจนไล่ออกซิเจนออกจากระบบ จากการ ศึกษาที่ผ่านมานงานวิจัยของ Heo และคณะ⁵ ได้ใช้ชีวมวลจากขี้เลื่อยเฟอร์นิเจอร์ก่อนใช้แก๊สหมุนวนได้ปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 59 แต่เมื่อใช้แก๊สหมุนวนได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 66 และงานวิจัยของ Heo และคณะ⁶ ได้ใช้ชีวมวลจากกลีบก่อนใช้แก๊สหมุนวนได้ปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 50 แต่เมื่อใช้แก๊สหมุนวนได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาชีวมวลจากกระถินยักษ์ว่าได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้นเท่าไร

จึงเป็นที่มาในการทำงานวิจัยนี้ นอกจากนั้นจากงานวิจัยของ Heo และคณะ⁵ และงานวิจัยของ Heo และคณะ⁶ ได้ทำการศึกษาแต่ปริมาณไบโอออยล์ที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นแต่ไม่ได้กล่าวถึงผลของการใช้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีต่อผลคุณสมบัติอย่างไร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษายู่ 2 ประเด็นที่ต่างจากงานวิจัยอื่นคือ การใช้ชีวมวลจากกระถินยักษ์และผลของการใช้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีต่อสมบัติไบโอออยล์ที่ได้

วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองในงานวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. การเตรียมชีวมวล

ชีวมวลที่นำมาทำการทดลองคือไม้กระถินยักษ์ที่ได้จากได้มาจากศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวลจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยนำมาอบแห้งและทำการบดย่อยให้มีขนาดอนุภาค 0.25 - 0.50 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องคัดแยกขนาดและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นในชีวมวลและนำชีวมวลมาวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละ

ของความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงที่ซึ่งผลที่ได้แสดงใน Table 1

Table 1 Proximate analysis of *Leucaena leucocephala*

Component	Wt%
Moisture	2.3
Volatile	78.0
Fixed carbon *	17.5
Ash	2.2

*Calculated by difference

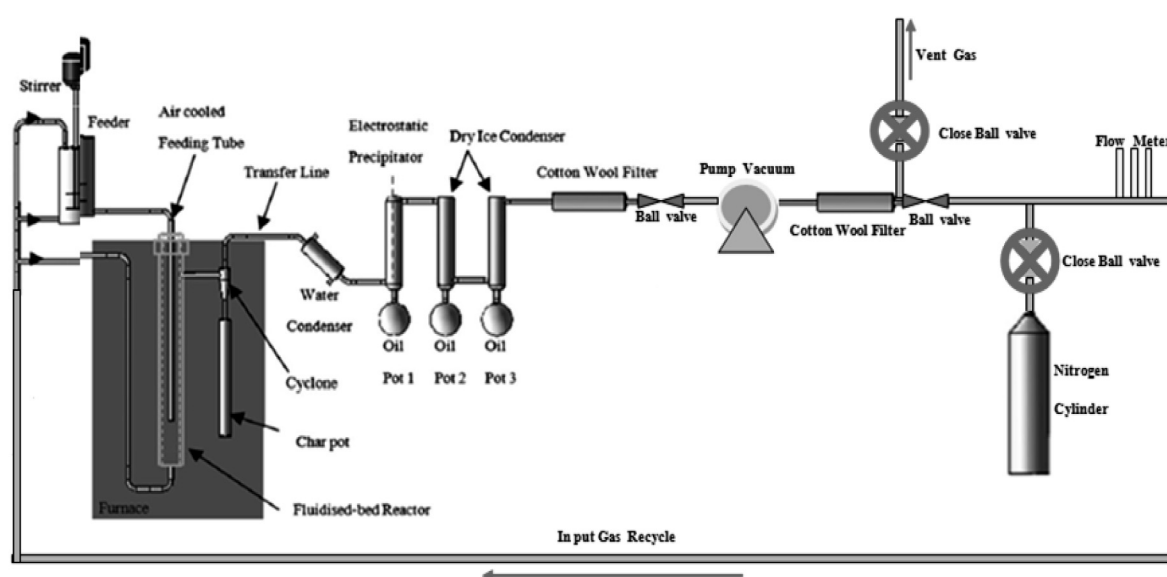


Figure 1 Schematic diagram of the recycle-gas fast pyrolysis apparatus

3. การออกแบบการทดลอง

โดยใน Table 2 แสดงเงื่อนไขการทดลองไพโรไลซิสแบบเร็วจากชีวมวลกระถินยักษ์ มีทั้งหมด 8 การทดลองซึ่งเป็นการศึกษาผลของการนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้

4. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์ที่ทำการทดลองนี้ได้แก่ ค่าความหนืด ความหนาแน่น ค่า pH ปริมาณของแข็งและค่าดัชนีเสถียรภาพ มีดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ความหนืด โดยใช้เครื่องมือทดสอบความหนืด CANNON Calibrated Visco meter Size 350 ทดสอบที่ 40°C ทำการวิเคราะห์โดยนำไบโอออยล์ไปทดสอบในหลอดวัดความหนืด อยู่ในมาตรฐาน ASTM D445

2. การหมุนเวียนของแก๊สในระบบการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ขั้นตอนการหมุนเวียนของแก๊สด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วซึ่งแสดงดัง Figure 1 โดยการทดลองเริ่มต้นจากการปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าในระบบการไพโรไลซิสเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากระบบ จากนั้นปล่อยแก๊สที่ไม่ควบแน่นทั้งก่อนพอร์บในการไหลของแก๊สคงที่และสามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สได้จึงปิดระบบการใช้แก๊สไนโตรเจนและระบบการปล่อยแก๊สทิ้ง จากนั้นก็จะเริ่มใช้แก๊สหมุนเวียนในระบบกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิตไบโอออยล์

จับเวลาที่ของเหลวไหลผ่านจุด 2 จุดโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก

4.2 ค่าความหนาแน่น ทำการวิเคราะห์โดยการชั่งตวงหารด้วยปริมาตรทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

4.3 การวัดค่า pH ทำการวัดโดยใช้ pH meter ที่อุณหภูมิห้องเพื่อต้องการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของไบโอออยล์ เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างมากสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการนำไบโอออยล์ไปใช้งาน

4.4 หาปริมาณของแข็ง ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง (Vacuum) ดูดไบโอออยล์ผ่านกระดาษกรองโดยใช้เอทานอลละลายโดยใช้กระดาษกรอง Filter Paper Qualitative 110 mm. 100 Circles ที่มีรูพรุน 6 ไมครอนจากนั้นนำกระดาษกรองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตามวิธีของ Oasma และคณะ⁷

4.5 ค่าดัชนีเสถียรภาพ (Stability Index)

คือเป็นการนำมาผ่านกระบวนการเร่ง (Ageing) โดยการนำไบโอออยล์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง เทียบเท่ากับการเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ปี ต้องการศึกษว่าไบโอออยล์ที่เก็บไว้ 1 ปี กับการผลิตใหม่ ๆ ความหนืดจะเปลี่ยนไปมากแค่ไหนมาคำนวณดังสมการ (1) ข้างล่างนี้ Oasmaa และคณะ⁸

$$\text{Stability} = \frac{MW_{\text{stored}} - MW_{\text{fresh}}}{\text{Storage days}} \text{ (g/mol day)} \quad (1)$$

5. ผลการทดลองและอภิปรายผล

5.1 ผลของอุณหภูมิโดยใช้ผลิตภัณฑ์แก๊สและแก๊สไนโตรเจน

จาก Figure 2 ผลที่ได้จากการใช้แก๊สไนโตรเจนทำการทดลองในอุณหภูมิช่วง 400-550 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์สูงที่สุดตามด้วย 450 500 550 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ถึงร้อยละ 56.47, 46.15, 43.85, 27.27 โดยน้ำหนักถ่านชาร์ร้อยละ 32.95, 15.60, 12.52, 19.43 โดยน้ำหนักและได้แก๊สที่ไม่ควบแน่นร้อยละ 10.58, 38.25, 39.63, 53.30 โดยน้ำหนัก และจากผลที่ได้จากการใช้ผลิตภัณฑ์แก๊สทำการทดลองในอุณหภูมิช่วง 400-550 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์สูงที่สุดตามด้วย 450 500 550 องศาเซลเซียสซึ่งได้ถึงร้อยละ 65.97, 57.79, 55.83, 36.86 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ร้อยละ 22.27, 18.60, 16.40, 14.00 โดยน้ำหนัก และได้แก๊สที่ไม่ควบแน่นร้อยละ 11.76, 23.61, 27.77, 49.15 โดยน้ำหนัก

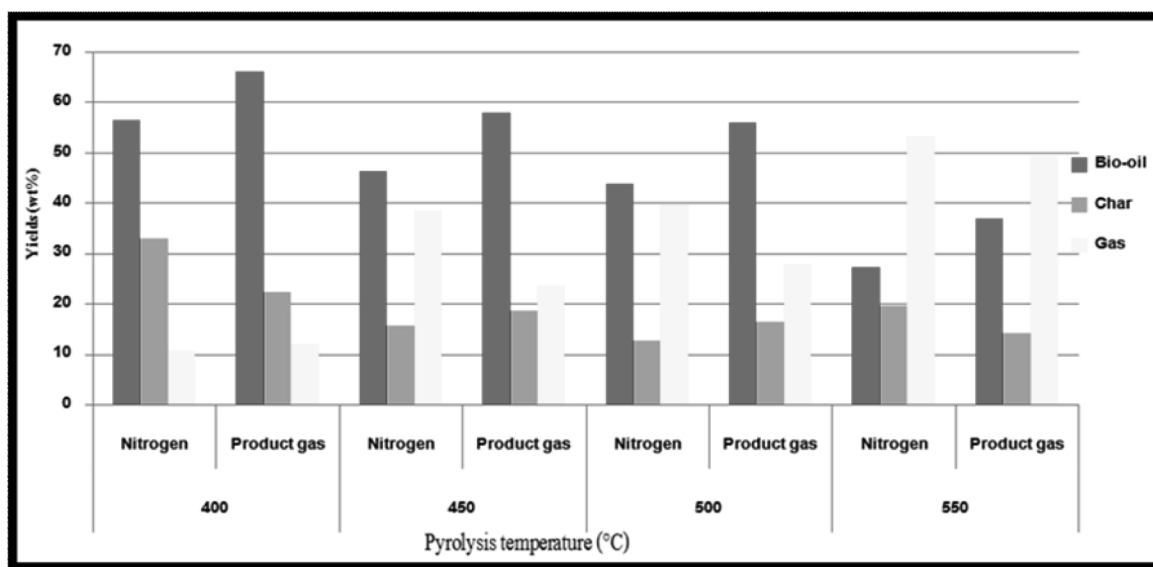


Figure 2 Effect of the recycle gas and pyrolysis temperature on product yields

Table 2 Experimental conditions

Parameter	Experiment							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Pyrolysis temperature (°C)	400	450	500	550	400	450	500	550
Fluidising medium type ^a	N	N	N	N	P	P	P	P
Gas flow rate (L/min)	10.5							
Biomass feed rate (g/hr)	100							
Biomass particle size (mm)	0.250-0.500							
Type of biomass	<i>Leucaena leucocephala</i>							
Filter medium	Glass wool							
Fluidising medium	Sand of 0.250-0.425 mm							

^aN and P refers to nitrogen and product gas, respectively

ดังนั้นจาก Figure 2 ทำการเปรียบเทียบแก๊สที่ใช้ในระบบระหว่างแก๊สไนโตรเจนและแก๊สหมุ่จะเห็นว่าไบโอเออยล์ที่ได้จากการใช้แก๊สหมุ่จะมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 65.97, 57.79, 55.83, 36.86 โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ไบโอเออยล์ที่ได้จากการใช้แก๊สไนโตรเจนในระบบคือ ร้อยละ 56.47, 46.15, 43.85, 27.27 โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณถ่านและแก๊สที่ได้จากการใช้แก๊สหมุ่จะมีค่าน้อยกว่าการใช้แก๊สไนโตรเจนในระบบ

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะเห็นว่าไบโอเออยล์ที่ได้จากการใช้แก๊สหมุ่จะมีปริมาณสูงกว่าผลิตภัณฑ์ไบโอเออยล์ที่ได้การใช้แก๊สไนโตรเจน ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Heo และคณะ⁵ ได้ศึกษาชีวมวลจากซีเลื้อยเฟอร์นิเจอร์ก่อนใช้แก๊สหมุ่จะได้ปริมาณไบโอเออยล์ร้อยละ 59 แต่เมื่อใช้แก๊สหมุ่จะได้ไบโอเออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 66 และงานวิจัยของ Heo และคณะ⁶ ได้ศึกษาชีวมวลจากเกลบก่อนใช้แก๊สหมุ่จะได้ปริมาณไบโอเออยล์ร้อยละ 50 แต่เมื่อใช้แก๊สหมุ่จะได้ไบโอเออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60

5.2 ผลของสมบัติของน้ำมันไบโอเออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

จากผลการทดลองใน Table 3 ของสมบัติของน้ำมันไบโอเออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว จะเห็นได้ว่าค่า pH เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 0.4-0.63 ปริมาณของแข็งที่ได้มีค่าลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 0.3-2.6

wt% ความความหนาแน่นมีค่าลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 0.01-0.02 g/ml ความหนืดมีค่าลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 1.1-30.2 cSt ดัชนีเสถียรภาพมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.19-1.8 จากการใช้แก๊สหมุ่ซึ่งผลของสมบัติที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mante และคณะ⁹ มีค่าดังนี้ pH เพิ่มขึ้น 0.49 ความหนาแน่นลดลง 0.05 g/ml และความหนืดลดลง 28.04 cSt

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการผลิตไบโอเออยล์ ก่อนใช้แก๊สหมุ่จะได้ปริมาณไบโอเออยล์ร้อยละ 56.47 แต่เมื่อใช้แก๊สหมุ่จะได้ไบโอเออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 65.97 ซึ่งการนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่มีผลต่อสมบัติของไบโอเออยล์คือค่า pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความหนาแน่นไม่ส่งผลต่อการทดลอง ค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงปริมาณของแข็งลดลง ซึ่งค่าดัชนีเสถียรภาพในการเก็บของไบโอเออยล์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่าลดลงและในอุณหภูมิที่ 450 500 550 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้ความอนุเคราะห์ อุปกรณ์-เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน

Table 3 Effect of pyrolysis temperature on properties of bio-oil

Pyrolysis temperature	400°C		450°C		500°C		550°C		475°C ^a	
Fluidising medium ^a	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
pH value	1.8	2.4	1.9	2.53	2	2.6	2.3	2.73	2.76	3.25
Solids content (wt%)	5.49	2.9	3.09	2.76	2.19	1.58	5.02	3.58	-	-
Density (kg/m ³)	1.13	1.12	1.13	1.11	1.14	1.12	1.15	1.13	1.17	1.12
Viscosity (cSt)	8.6	7.5	29.4	9.7	31.6	10.5	45.8	15.6	82	53.96
Stability	1.21	0.62	0.92	2.4	1.78	1.59	1.79	3.59	-	-

^aN and P refers to nitrogen and product gas, respectively

เอกสารอ้างอิง

1. Santisirisomboon JL, B. Chungpaibulpatana, S. Impacts of biomass power generation and CO₂ taxation on electricity generation expansion planning and environmental emissions. *Energy Policy*. 2001; 29:975-85.
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. สมบัติ ที่มทรัพย์ (2551) เรื่องกระบวนการไพโรไลซิส, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มาหนังสือพิมพ์ฐาน เศรษฐกิจ ฉบับที่ 2362 2 ต.ค. - 4 ต.ค. 2551 <http://promptmark.co.th>, เข้าดูเมื่อวันที่12/09/2554
4. วีรชัย อาจหาญ. รายงานการวิจัยเรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการปลูกไม้โตเร็วเพื่อเป็นพลังงานชีวมวล. หน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำนัก วิชาวิศวกรรม ศาสตร มหาวิทาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,. 2551:หน้า 1 - 39.
5. Heo HS, Park HJ, Park Y-K, Ryu C, Suh DJ, Suh Y-W, et al. Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed. *Biore-source Technology*. 2010;101(1, Supplement):S91-S6.
6. Heo HS, Park HJ, Dong J-I, Park SH, Kim S, Suh DJ, et al. Fast pyrolysis of rice husk under different reaction conditions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2010;16(1):27-31.
7. Oasmaa APP, C. . Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids:. 2010:VTT, p.134.
8. Oasmaa AK, E. . Fast Pyrolysis of Forestry Residue. 3. Storage Stability of Liquid Fuel. *Energy & Fuels*, . 2003:Vol. 17, pp.1075-84.
9. Mante OD, Agblevor FA, Oyama ST, McClung R. The influence of recycling non-condensable gases in the fractional catalytic pyrolysis of biomass. *Bioresource Technology*. 2012;111(0):482-90.