



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวลที่ได้จากก้านใบยาสูบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ferrierite, ZSM-5 และ Co-Mo/Al₂O₃

Upgrading of bio-oil derived from tobacco using ferrierite, ZSM-5 and Co-Mo/Al₂O₃ catalysts

สาวิตรี มูลิกา และ อภิญญา ดวงจันทร์*

Sawitree Mulika and Apinya Duangchan*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

Received January 2014

Accepted May 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวมวล (bio-oil) จากเศษก้านใบยาสูบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450-550°C ปรับปรุงคุณภาพน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ferrierite, ZSM-5, Al₂O₃, Co-Mo/Al₂O₃ และ Mo₂C การไพโรไลซิสกระทำในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ด้วยความเร็วสเปซของไนโตรเจน 1.7 h⁻¹ และทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500°C ผลการไพโรไลซิสได้ผลได้ของเหลวสูงสุดที่ 500°C คือร้อยละ 47.1 มีค่าความร้อน 36.3 MJ/kg oil (organic phase) ถ่านชาร์ร้อยละ 36.7 และแก๊สร้อยละ 16.2 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ferrierite, ZSM-5, Al₂O₃, Mo₂C และ Co-Mo/Al₂O₃ ทำให้น้ำมันมีค่าความร้อน 22.5, 24.7, 26.1, 35.8 และ 36.8 MJ/kg oil (organic phase) ตามลำดับ

คำสำคัญ : ไพโรไลซิส ก้านใบยาสูบ น้ำมันชีวมวล Ferrierite ZSM-5 Co-Mo/Al₂O₃

Abstract

This research aims to investigate bio-oil yield of tobacco leave by pyrolysis at 450-550°C. The bio-oil was upgraded by ferrierite, ZSM-5, Al₂O₃, Co-Mo/Al₂O₃ and Mo₂C catalysts. Pyrolysis was carried out in a semi-batch reactor with a space velocity of 1.7 h⁻¹ under nitrogen atmosphere. The highest liquid yield of 47.1% was observed at 500°C with the high heating value of 36.3 MJ/kg oil (organic phase). Furthermore, char and gas yields were 36.7 and 16.2%, respectively. As a result, the high heating values of the bio-oils catalyzed at 500°C by ferrierite, ZSM-5, Al₂O₃, Mo₂C and Co-Mo/Al₂O₃ were 22.5, 24.7, 26.1, 35.8 and 36.8 MJ/kg oil (organic phase), respectively.

Keywords : Pyrolysis, Tobacco leave, Bio-oil, Ferrierite ZSM-5 Co-Mo/Al₂O₃

* Corresponding author.

Email address: s.mulika@hotmail.com (Mulika, S.), fengapd@ku.ac.th* (Duangchan, A.)

doi: 10.14456/kkuenj.2015.3

1. บทนำ

เศษก้านไบยาสูบเป็นชีวมวลที่น่าสนใจเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะมีค่าความร้อน และสารประกอบคาร์บอนที่ค่อนข้างสูง คือมีค่าความร้อน 15-16 MJ/kg และ H/C เท่ากับ 1.6-1.8 [1] เมื่อทำการไพโรไลซิสได้น้ำมันชีวมวลที่มีปริมาณออกซิเจนสูงประกอบด้วยกรด เอสเทอร์ อัลดีไฮด์ แอลกอฮอล์ คีโตน ฟีนอล และอื่นๆ แต่น้ำมันชีวมวลที่ได้ยังมีค่าความร้อนไม่สูงพอเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ได้จากฟอสซิล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้งาน แนวทางการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับวิธีหนึ่งคือการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา [2] ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ferrierite, ZSM-5, Al_2O_3 , Mo_2C และ Co-Mo/ Al_2O_3 ferrierite มีความสามารถแตกกิ่งได้ใกล้เคียงกับ SUZ-4 แต่สามารถถ่ายเทไฮโดรเจนได้ดีกว่า [3] Bulushev และ Ross [4] ได้รายงานว่ ZSM-5 สามารถดึงออกซิเจนออกได้ดีกว่าซีโอไลต์อื่นที่มีรูพรุนใหญ่กว่าและเกิดปฏิกิริยา aromatization จากปฏิกิริยา Diels-Alder ของสารโอเลฟินมารวมกันเกิดเป็นสารประกอบวงแหวน และอะโรแมติก [4] และ HZSM-5 ให้ไฮโดรคาร์บอนสูงสุดเมื่อเทียบกับซีลิเกต H-mordenite H-Y และ ซิลิกา-อะลูมินา [5] Akalin and Karagoz [6] ไพโรไลซิสก้านยาสูบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al_2O_3 , Fe_2O_3 , $AlCl_3$ และ $SnCl_4$ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือ Al_2O_3 (52%) งานวิจัยของ Choi และ Brenner [7] พบว่า molybdenum carbide (Mo_2C) สามารถดึง pyridine ออกได้ดี เกิดปฏิกิริยา hydrodenitrogenation ได้สูง ส่วนการเพิ่มโลหะ Co, Mo บนตัวเร่งปฏิกิริยา Al_2O_3 จะทำให้น้ำมันมีคุณสมบัติดีขึ้นเนื่องจากโลหะ Co มีความสามารถในการกำจัดซัลเฟอร์ และมีปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงสูง [8] ส่วนโลหะ Mo ทำให้เร่งปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงกรดอะซิติกสูงจาก 8.37% เป็น 33.20% [9]

งานวิจัยนี้ทำการผลิตน้ำมันชีวมวลจากเศษก้านไบยาสูบด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิระหว่าง 450-550°C เพื่อดูผลได้สูงสุดของผลิตภัณฑ์ของเหลว และศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวลเพื่อให้ค่า

ความร้อนสูงขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ferrierite, ZSM-5, Al_2O_3 , Mo_2C และ Co-Mo/ Al_2O_3 และศึกษาผลการเติมโลหะ Co, Mo บนตัวเร่งปฏิกิริยา Al_2O_3 ต่อ คุณภาพน้ำมันชีวมวลที่ได้

ผลได้ของเหลวที่ได้จากงานวิจัยนี้นำไปเทียบกับของ Akalin และ Karagoz [1] ซึ่งได้รับผลได้ร้อยละ 30.6-48.9 โดยน้ำหนัก และเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติต่างกันทำให้ทราบชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวลนี้

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ได้แก่ เศษไบยาสูบพันธุ์เตอร์กิช ซึ่งเหลือจากการตัดใบส่งโรงงานยาสูบ จากจังหวัดนครพนม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยน้อยกว่า 2 mm อบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 4 h สมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบแบบประมาณของเศษก้านไบยาสูบ

| สมบัติ | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|---------------------|------------------|
| ความชื้น | 4.98 |
| ส่วนที่เป็นสารระเหย | 72.90 |
| คาร์บอนคงตัว | 3.32 |
| ซีเถ้า | 18.80 |

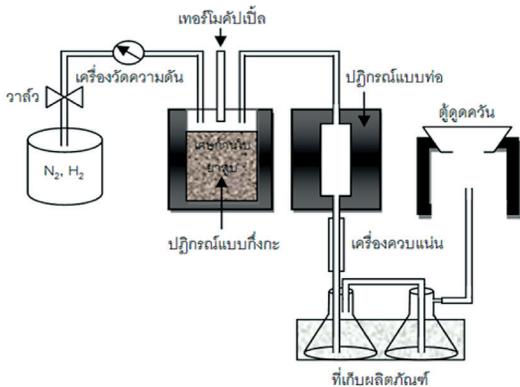
2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา Ferrierite ($SiO_2/Al_2O_3 = 20$) จากบริษัท Zeolyst International ZSM-5 ($SiO_2/Al_2O_3 = 30$) Al_2O_3 (>95%) จากบริษัท Ajax chemicals Co- Mo/ Al_2O_3 เตรียมด้วยวิธีเอ็บซุ่มแบบเปียกสัดส่วนโดยโมลของโลหะ Mo และ Co บน Al_2O_3 เท่ากับ 7 ต่อ 3 ใช้ $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ และ $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ จากบริษัท Ajax chemicals เป็นแหล่งให้ Co และ Mo ตามลำดับ และ Mo_2C (>95%) จากบริษัท Aldrich

2.3 การไพโรไลซิส

ทำการไพโรไลซิสและการปรับปรุงคุณภาพโดยบรรจุเศษไบยาสูบ 150 g ที่ผ่านการอบแห้งและ

ลดขนาดแล้วลงในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ด้วยความเร็วสเปซของไนโตรเจน 1.7 h⁻¹ อัตราการให้ความร้อน 2.5°C/min ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30°C) จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 450, 500 และ 550°C และคงอุณหภูมิสุดท้ายไว้เป็นเวลา 1 h ผลิตภัณฑ์บางส่วนถูกควบแน่นเป็นของเหลวและกักเก็บในขวดบรรจุผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปฏิกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิส

หลังจากเก็บผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้วัฏภาคของสารอินทรีย์ (organic phase) ของน้ำมันชีวมวลแยกออกจากส่วนของวัฏภาคน้ำ (aqueous phase) อย่างชัดเจน ก่อนนำวัฏภาคสารอินทรีย์ไปทดสอบสมบัติต่างๆ การไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะบรรจุทรายลงในปฏิกรณ์แบบท่อ และบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแทนทรายกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4 การสลายตัวทางความร้อนของก้านไบบาสุบ

ศึกษาการสลายตัวของก้านไบบาสุบโดยความร้อนด้วยเครื่อง Thermo gravimetric analyzer (TGA) โดยให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน เพื่อหาช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของก้านไบบาสุบ

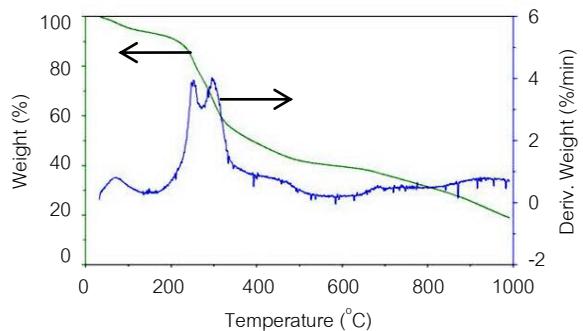
2.5 สมบัติของน้ำมันชีวมวล

วัดค่าความร้อน (heating value) ของวัฏภาคสารอินทรีย์ของน้ำมันชีวมวลโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter และวัดค่า pH ด้วย pH meter และหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกตรัม

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การสลายตัวด้วยความร้อนของเศษก้านไบบาสุบ

จากผลการสลายตัวด้วยความร้อนของเศษก้านไบบาสุบจากเครื่อง TGA ตามรูปที่ 2 พบว่าช่วงอุณหภูมิห้องถึง 100 °C เป็นการระเหยของความชื้นช่วงอุณหภูมิ 200-400°C, 400-600°C และ 600-800°C เกิดการสลายตัวประมาณร้อยละ 49.5, 20.8 และ 19.7 ตามลำดับ การสลายตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วง 200-400°C จึงควรไพโรไลซิสที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 400°C ดังนั้นจึงทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450-550°C เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม



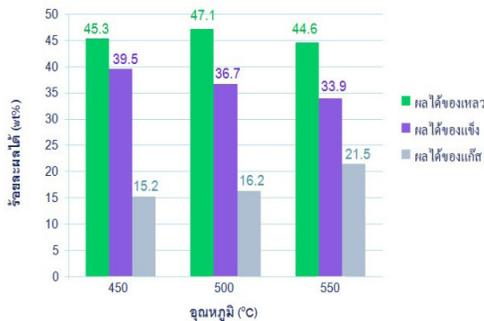
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเศษก้านไบบาสุบที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3.2 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อผลได้ของเหลว

เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 450-550°C พบว่าที่อุณหภูมิ 500°C ได้ผลได้ของเหลวสูงสุดคือร้อยละ 47.1 ถ่านชาร์ร้อยละ 36.7 และแก๊สร้อยละ 16.2 ตามรูปที่ 3 อุณหภูมิที่เหมาะสมขึ้นกับชนิดของไบบาสุบแต่ งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอยู่ระหว่าง 400-550°C [1, 10] ผลได้ของเหลวในงานวิจัยนี้คือร้อยละ 44.6-47.1 สอดคล้องกับงานของ Akalin [1] ซึ่งได้ผลได้ของเหลวร้อยละ 30.6-48.9 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 3 แสดงแนวโน้มให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยเกิดการเปลี่ยนไปเป็นของเหลวและแก๊ส ในขณะที่ของเหลวมีปริมาณสูงที่สุดที่ 500°C และลดลงเพราะแตกตัวไปเป็นแก๊สมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น

3.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณภาพน้ำมันชีวมวล

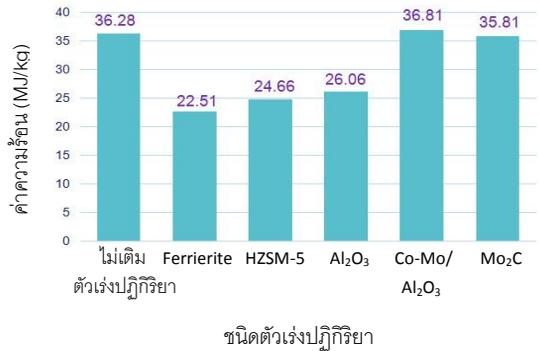
จากรูปที่ 4 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลส่วนสารอินทรีย์ที่ผลิตได้ที่ 500°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (น้ำมันดิบ) 36.3 MJ/kg oil (organic phase) สูงกว่าไบโอชาร์ (27-28 MJ/kg bio char) และมีค่า pH 9.6 มีความเป็นเบสสูง เนื่องจากในน้ำมันชีวมวลของก้านยาสูบมีสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นเบส (s)-3-(1-methyl-2-pyrrolidinyl)-pyridine (C₁₀H₁₄N₂) ปริมาณมาก (ร้อยละ 23.79-33.48 ขึ้นกับชนิดของเศษยาสูบ) [1] ซึ่งต่างจากน้ำมันชีวมวลทั่วไปซึ่งมักเป็นกรดและมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า เปรียบเทียบดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 ร้อยละผลได้ของเหลว ของแข็งและแก๊สจากการไพโรไลซิสเศษก้านใบยาสูบ ในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะความเร็วสเปซของไนโตรเจน 1.7 h⁻¹

จากรูปที่ 4 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ferrierite, ZSM-5, Al₂O₃ และ Mo₂C ให้น้ำมันที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดิบคือ 22.5, 24.7, 26.1 และ 35.8 MJ/kg oil (organic phase) ตามลำดับ จะเห็นว่า ferrierite, ZSM-5 และ Al₂O₃ ซึ่งมี SiO₂ และ Al₂O₃ เป็นองค์ประกอบและมีความสามารถในการแครกกิ่ง [8, 11, 12] ไม่ช่วยในการเพิ่มค่าความร้อน เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ พบว่าให้ค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 36.8 MJ/kg oil (organic phase) ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มโลหะ Co และ Mo ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา Al₂O₃ โลหะ Co และ Mo เป็นตัวช่วยเสริมปฏิกิริยา hydrodeoxygenation ซึ่งจากงานวิจัยของ Wonghirunyawat [13] พบว่า O/C ลดลงจาก 0.18 เป็น 0.03 เมื่อใช้ Co-Mo/Al₂O₃ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวล ส่วน Mo₂C

ซึ่งมี Mo เป็นองค์ประกอบก็ให้น้ำมันมีค่าความร้อนสูงถึง 35.8 MJ/kg oil (organic phase) ใกล้เคียงกับ Co-Mo/Al₂O₃



รูปที่ 4 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสเศษก้านใบยาสูบที่ 500°C ในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะความเร็วสเปซของไนโตรเจน 1.7 h⁻¹

ตารางที่ 2 ค่าความร้อนและ pH ของน้ำมันชีวมวลจากชีวมวลที่แตกต่างกัน

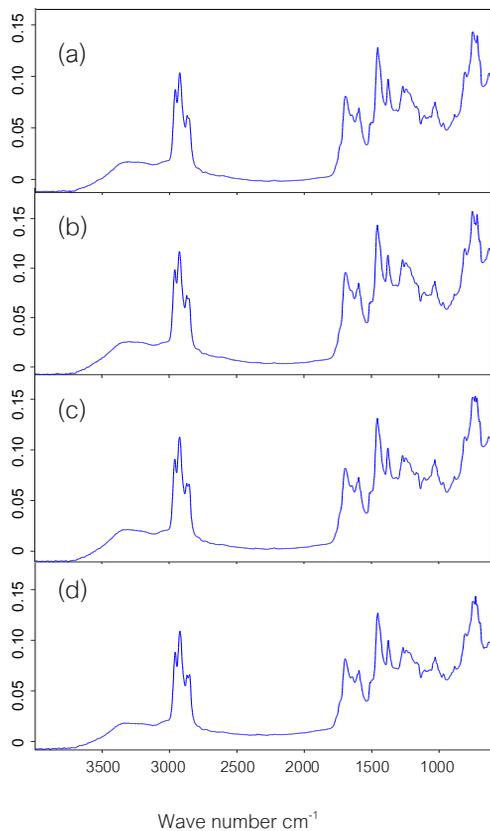
| ชนิดชีวมวล | ค่าความร้อน (MJ/kg) | pH |
|----------------|---------------------|------------------|
| เศษก้านใบยาสูบ | 36.3 | 9.6 |
| มันสำปะหลัง | 26.9 ^a | 3.1 ^a |
| ฟางข้าว | 18.6 ^b | 2.7 ^b |
| แกลบ | 28.7 ^c | 3.0 ^c |

^aข้อมูลจาก Adisak and Suntorn [14]

^bข้อมูลจาก Jung et al. [15]

^cข้อมูลจาก Muhammad et al. [16]

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นผลอินฟราเรดสเปกตรัมที่มีค่าไม่ต่างกัน แสดงว่าน้ำมันชีวมวลที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา ยังคงมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นพื้นฐานของน้ำมันชีวมวลจากเศษก้านใบยาสูบใกล้เคียงกันแต่ปริมาณแตกต่างกันเล็กน้อย



รูปที่ 5 ผลอินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากเศษก้านใบยาสูบจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 500°C ในปฏิกรณ์แบบกึ่งกะความเร็วสเปซของไนโตรเจน 1.7 h^{-1} (a) น้ำมันดิบ (b) Ferrierite (c) HZSM-5 และ (d) Co-Mo/ Al_2O_3

4. สรุป

อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสเศษก้านใบยาสูบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดคือ 500°C น้ำมันชีวมวลที่ได้มีค่าความร้อน 36.8 MJ/kg oil (organic phase) pH 9.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา ferrierite, ZSM-5 และ Al_2O_3 ในบรรยากาศไนโตรเจนไม่เหมาะต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันจากการไพโรไลซิสก้านใบยาสูบ การเติมโลหะ Co และ Mo บนตัวเร่งปฏิกิริยา Al_2O_3 ช่วยทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจากเมื่อใช้เฉพาะ Al_2O_3 ถึง 41.25%

สิ่งที่ควรศึกษาต่อไปคือการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันด้วย Co-Mo/ Al_2O_3 ในบรรยากาศไฮโดรเจน และ

เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Mo_2C ที่ยังไม่ผ่านการเพิ่มโลหะ Co ลงไปมีค่าความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา ferrierite, HZSM-5 และ Al_2O_3 ดังนั้นจึงควรทำการทดลองเพิ่มโลหะ Co ลงไปบน Mo_2C เพื่อช่วยให้เกิดการ deoxygenation ที่ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ และสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Akalin MK, Karagoz S. Tobacco residue pyrolysis. *Bio Resources* 2011;6(2):1520-31.
- [2] Bertero M, Puente G, Sedran U. Fuels from bio-oils: Bio-oil production from different residual sources, characterization and thermal conditioning. *Fuel* 2012;95:263-71.
- [3] Lukyanov DB, Zholobenko VL, Dwyer J, Barri SAI, Smith WJ. On the structural, acidic and catalytic properties of zeolite SUZ-4. *J. Phys. Chem. B* 1999;103:197-202.
- [4] Bulushev DA, Ross JRH. Catalysis for conversion of biomass to fuels via pyrolysis and gasification. A review, *Catalysis Today* 2011;171:1-13.
- [5] Adjaye JD, Bakhshi NN. Upgrading of a wood-derived oil over various catalysts. *Biomass and Bioenergy* 1994;7:201-11.
- [6] Akalin MK, Karagoz S. Tobacco residue pyrolysis. *Bio Resources* 2011;6(2):1773-805.
- [7] Choi JG, Brenner JR. Pyridine hydrodenitrogenation over molybdenum carbide catalysts. *Journal of catalysis* 1995;154:33-40.
- [8] Hossain MM, Al-Saleh MA, Shalabi MA, Kimura T, Inui T. Pd-Rh promoted Co/HPS catalysts for heavy oil upgrading. *Applied Catalysis A: General* 2004;278:65-71.

- [9] Xu Y, Wang T, Ma L, Zhang Q, Wang L. Upgrading of the liquid fuel from the vacuum pyrolysis of biomass over $\text{MoNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalysts. *Biomass and Bio energy* 2009;33:1030-6.
- [10] Putun AE, Onal E, Uzun BB, Ozbay N. Comparison between the slow and fast pyrolysis of tobacco residue, *Ind. Crop Prod* 2007;26:307-14.
- [11] Dickerson T, Soria J. Catalytic fast pyrolysis: A review. *Energies* 2013;6:514-38.
- [12] Laksmo N, Paraschiv M, Loubar K, Tazerout M. Biodiesel production from biomass gasification tar via thermal/catalytic cracking. *Fuel processing technology* 2013;106:776-83.
- [13] Wonghirunyawat CV. Upgrading of bio-oil from coffee bean residue by hydrodeoxygenation and alkylation reactions using Co-Mo/MCM-41 and acid catalyst. M.E. Thesis, Kasetsart University, Bangkok; 2011. (In Thai).
- [14] Adisak P, Suntorn 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;95: 227-35.
- [15] Jung SH, Kang BS, Kim JS. 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. *Journal of analytical and applied pyrolysis* 2008;82: 240-7.
- [16] Muhammad S, Abu B, James O, Titiloye. Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *Journal of analytical and applied pyrolysis* 2013;103:362-8.