

การศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝังโลหะ บนตัวรองรับโดโลไมต์ต่อการลดลงของน้ำมันทาร์จากยูคาลิปตัส Catalytic Performance Study of Metal Impregnated on Dolomite Support for Eucalyptus Tar Reduction

ดร. ภัทรพร ชัยประเสริฐ¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเตรียมโดยวิธีการเคลือบฝังโลหะนิกเกิลบนตัวรองรับโดโลไมต์ ผลงานวิจัยพบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 45% เป็น 70% และปริมาณน้ำมันทาร์จากไม้ยูคาลิปตัสมีแนวโน้มลดลงจาก 20% เป็น 2% เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์ที่มีโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง จากการศึกษาองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ พบว่า ปริมาณ H_2 , CO และ CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ CH_4 มีแนวโน้มลดลง เป็นผลจากประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฝังด้วยโลหะนิกเกิล ซึ่งเป็นโลหะที่ว่องไวและมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิงได้ดี

คำสำคัญ: นิกเกิล, โดโลไมต์, ทาร์, ยูคาลิปตัส

Abstract

The purpose of this research was to study the catalytic performance of metal impregnated on dolomite support. The results showed that the presence of catalyst increased in gas products content from 45 % to 70 % and decreased in eucalyptus tar content from 20 % to 2%. It was found that this catalyst was effective for tar cracking reaction from high molecular weight hydrocarbon to lower molecular weight. The tendency of gas compositions increased in H_2 , CO and CO_2 content whereas CH_4 content was decreased. According to catalytic performance of impregnated nickel, it acted as an active metal and promoted reforming reaction.

Keywords: Nickel, Dolomite, Tar, Eucalyptus

¹อาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

E-mail: pattaraporn@eau.ac.th

ความนำ

แหล่งพลังงานคืนรูป เป็นแหล่งพลังงานที่กำลังได้รับความนิยม ได้แก่ แหล่งพลังงานจากชีวมวล แต่ชีวมวลส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งไม่เหมาะนำมาใช้เป็นพลังงาน จึงต้องแปรสภาพให้อยู่ในรูปที่ใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นโดยผ่านกระบวนการทางเทอร์โมเคมีคอลที่เรียกว่า แกซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยความร้อนและปฏิกิริยาเคมีในการแปรรูปซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ปัจจุบันแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการอื่นๆ เช่น กระบวนการเตรียมไดเมทิลอีเทอร์ เมทานอล เชื้อเพลิงเหลว สารเคมีในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ไฮโดรเจนใช้กับรถยนต์ เซลล์เชื้อเพลิง ใช้ผลิตไฟฟ้าและพลังงานความร้อน เป็นต้น

ปัญหาส่วนใหญ่ของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงคือเกิดน้ำมันหรือคาร์บอนจากกระบวนการป้อนอยู่เป็นจำนวนมาก โดยน้ำมันหรือคาร์บอนมีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด สีน้ำตาลออกดำ มีกลิ่นฉุน ซึ่งน้ำมันหรือคาร์บอนที่เจือปนนั้นก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบ ดังนั้น จึงต้องทำการกำจัดหรือลดปริมาณคาร์บอน เพื่อให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่สะอาดขึ้น (Devi & Ptasinski, 2003) การกำจัดน้ำมันหรือคาร์บอนมี 2 วิธี คือ การแตกตัวโดยใช้อุณหภูมิสูงและการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันหรือคาร์บอนที่ได้ผลคือการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลงานวิจัยที่ได้ศึกษามาแล้วพบว่ากระบวนการแกซิฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันหรือคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดคือ โคโลไมต์ โลหะอัลคาไลน์ และนิกเกิล (Abu El-Rub, Bramer & Brem, 2004; Wang & Chang, 2005)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝังโลหะบนตัวรองรับโคโลไมต์ต่อการลดลงของน้ำมันหรือคาร์บอนจากไม้ยูคาลิปตัสและศึกษาปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองได้แก่ชีวมวลและตัวเร่งปฏิกิริยา ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือไม้ยูคาลิปตัส

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือในการวิจัยเป็นชุดทดลอง ประกอบด้วย

1. ส่วนแก๊สตัวพา
2. ส่วนป้อนชีวมวล
3. เครื่องผลิตไอน้ำ
4. เครื่องปฏิกรณ์และชุดควบคุมอุณหภูมิ
5. เครื่องควบแน่น
6. ชุดเก็บน้ำมันหรือคาร์บอน
7. ชุดเก็บแก๊ส

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (experimental research) ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. การเตรียมสารชีวมวล

นำไม้ยูคาลิปตัสมาบดให้มีขนาด 0.8 - 1.0 เซนติเมตร

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝังด้วยโลหะบนตัวรองรับโคโลไมต์ (support) ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง โลหะที่ใช้เคลือบบนตัวรองรับคือนิกเกิล โดยการเตรียมสารละลายอิมเพกแนนต์ (impregnant) จากนิกเกิลไนเตรดเฮกซะไฮเดรต 4.32 กรัมในน้ำกลั่น นำสารละลายอิมเพกแนนต์ที่เตรียมได้มาเคลือบบนตัวรองรับโคโลไมต์ปริมาณ 10 กรัม พร้อมทั้งคนตลอดเวลาจนกระทั่งรวมเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเคลือบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ลักษณะของพื้นที่ผิว และวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์โลหะนิกเกิลที่เคลือบบนตัวรองรับโคโลไมต์ (Srinakruang, Sato, Vitidsant & Fujimoto, 2005).

3. การทดลอง

ทำการทดลองในชุดทดลอง โดยการป้อนชีวมวล ปริมาณ 1 กรัม ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 1 กรัม ทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 500-700 องศาเซลเซียส ผ่านแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สตัวพาให้อัตราการไหลคงที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการป้อนไอน้ำ 0.75 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บแก๊สผลิตภัณฑ์และน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองหลังจากผ่านการควบแน่นที่อุณหภูมิห้อง นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์และวิเคราะห์หาโครงสร้างของน้ำมันทาร์ต่อไป ทำการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการแตกตัวของน้ำมันทาร์เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิจัย

ศึกษาสมบัติทางเคมีของสารชีวมวล ในการทดลองใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นสารชีวมวล การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์สมบัติของสารชีวมวล โดยการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ด้วยเครื่อง CHN analyzer ดังแสดงในตาราง 1 และ ตาราง 2 ตามลำดับ

ตาราง 1

การวิเคราะห์แบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น (Moisture)	4.12
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	20.80
สารระเหยได้ (Volatile matter)	73.98
เถ้า (Ash)	1.10

ตาราง 2

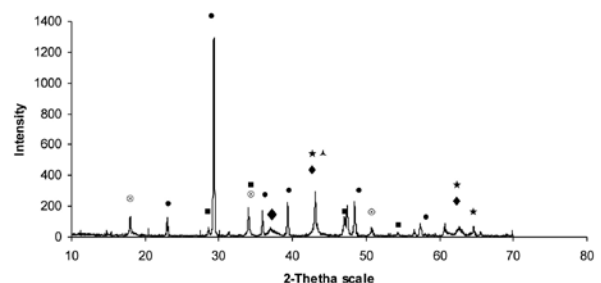
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

ผลการวิเคราะห์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	40.00
ไฮโดรเจน (H)	5.47
ไนโตรเจน (N)	0.45
ออกซิเจน (O)	54.08

ผลการวิเคราะห์พบว่า ไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณสารระเหยได้ 73.98 % ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณทาร์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่สูงเมื่อสลายตัวด้วยความร้อน และผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุพบว่าธาตุ C, O และ H เป็นองค์ประกอบหลักของไม้ยูคาลิปตัส

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

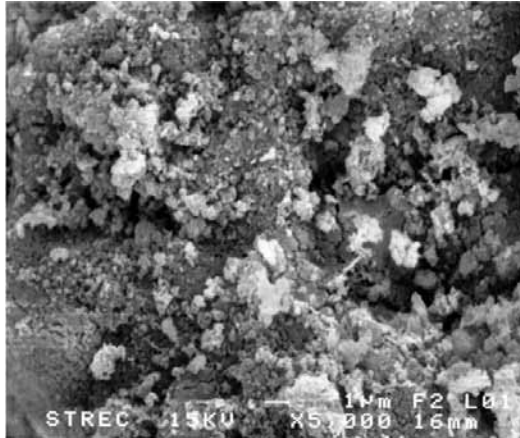
องค์ประกอบทางเคมีของโดโลไมต์ก่อนนำไปแคลไซด์ อยู่ในรูปของแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 , MgCO_3) นำตัวเร่งปฏิกิริยามาเตรียมโดยวิธีการเคลือบผงด้วยโลหะนิกเกิล (10%) แล้วผ่านการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาดังภาพ 1 พบตำแหน่งพีคของนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ $2\theta = 37.3^\circ$ และ $2\theta = 43.2^\circ$ พีคของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่ $2\theta = 43.1^\circ$ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ $2\theta = 29.4^\circ$ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ $2\theta = 39.5^\circ$ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH_2) ที่ $2\theta = 18.09^\circ$ และ $2\theta = 34.1^\circ$



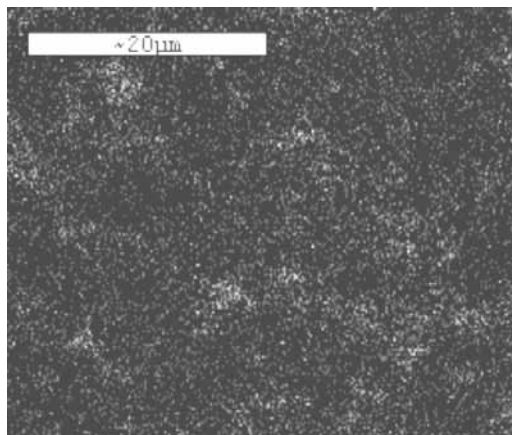
◆ NiO ★ MgO ⊗ Ca(OH)_2 ● CaCO_3 ■ CaO

ภาพ 1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง XRD

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบฝังด้วยโลหะนิกเกิลไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง scanning electron microscopy (SEM) พบว่านิกเกิลออกไซด์ (NiO) มีการฝังตัวบนพื้นผิวของตัวรองรับโคโลไมต์ ดังภาพ 2 และปรากฏจุดสีขาวของนิกเกิลกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอบนตัวรองรับโคโลไมต์โดยการทำ mapping ดังภาพ 3 ตามลำดับ



ภาพ 2 การเคลือบฝังของนิกเกิลบนพื้นผิวของตัวรองรับโคโลไมต์เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM

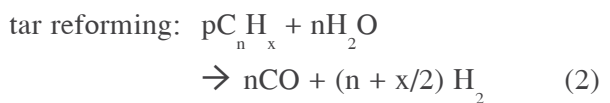
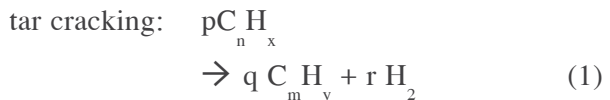


ภาพ 3 แสดงการกระจายตัวของนิกเกิลบนตัวรองรับโคโลไมต์

3. เปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

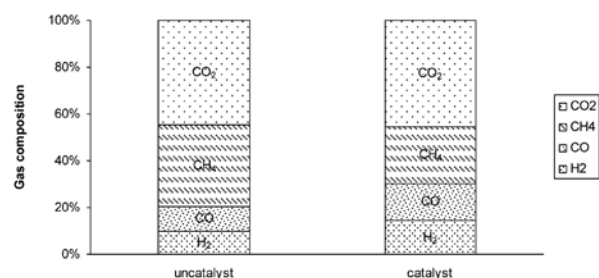
เมื่อทำการทดลองศึกษาผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแก๊สซิฟิเคชันที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา แนวโน้มปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 45 % เป็น 70 % ในขณะที่ปริมาณทาร์ลดลงจาก 20 %

เป็น 2 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว (cracking) ของไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์ไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ดังสมการ (1)-(2) (Devi, Ptasiński & Janssen, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างน้ำมันทาร์ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่าน้ำมันทาร์ที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง



(C_nH_x หมายถึง ทาร์, C_mH_y หมายถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่าทาร์)

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) พบว่าองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยแก๊ส 4 ชนิดคือ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) จากการทดลองพบว่า H_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 9.05 % เป็น 15.22 % และ CO เพิ่มขึ้นจาก 9.98 % เป็น 16.93 % ในขณะที่ CO_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 41.85 % เป็น 48.55 % และ CH_4 ลดลงจาก 32.40 % เป็น 25.98 % ดังภาพ 4



ภาพ 4 เปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

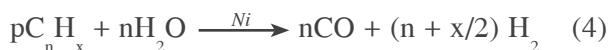
ผลการศึกษาชนิดองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการเพิ่มขึ้นของแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ เกิดจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (steam reforming) ดังสมการที่

(3)-(4) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดไปข้างหน้า (อนวรรตน์ เกตุคง, 2547)

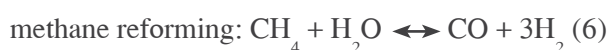
hydrocarbon reforming:



tar reforming:

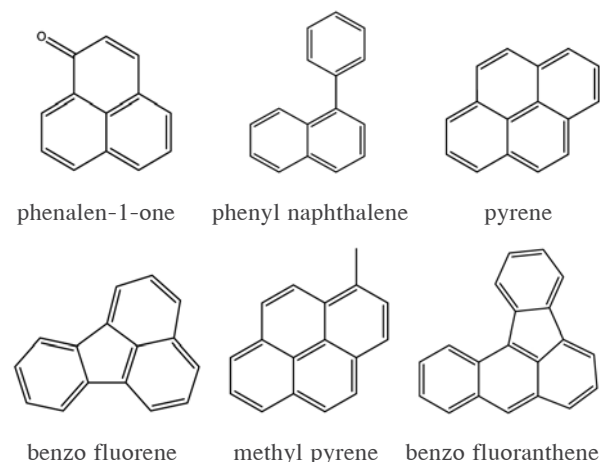


การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์มาจากปฏิกิริยาชิฟท์ (water-gas shift) สมการที่ 5 (Abu El-Rub, Bramer & Brem, 2004) และการลดลงของมีเทนมาจากปฏิกิริยา มีเทนรีฟอร์มมิง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน สมการที่ 6 (Demirbas, 2002)



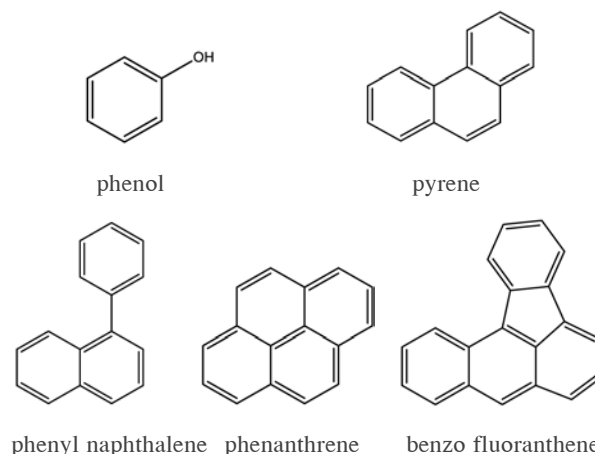
4. การแตกตัวของน้ำมันทาร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อเก็บตัวอย่างน้ำมันทาร์ของยูคาลิปตัสที่ได้จากกระบวนการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างของทาร์ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่าองค์ประกอบที่สามารถตรวจพบได้ของน้ำมันทาร์เป็นสารโพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (poly aromatic hydrocarbon) ได้แก่ phenalen-1-one, phenyl naphthalene, pyrene, fluorene, benzo naphthofuran, benzo fluorene, methyl pyrene, และ benzo fluoranthene ซึ่งโครงสร้างเป็นวงเบนซีนขนาดตั้งแต่ 3-5 วง ดังภาพ 5



ภาพ 5 น้ำมันทาร์ของยูคาลิปตัสที่ได้จากกระบวนการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เปรียบเทียบกับน้ำมันทาร์ของยูคาลิปตัสที่ได้จากกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณน้ำมันทาร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่อง GC-MS พบว่าโครงสร้างของน้ำมันทาร์เป็นสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนชนิด phenol, phenanthrene, phenyl naphthalene, pyrene, benzo fluorene และ benzo fluoranthene ซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงเบนซีนขนาดเล็กลง ดังภาพ



ภาพ 6 น้ำมันทาร์ของยูคาลิปตัสที่ได้จากกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สรุปและอภิปรายผล

ในกระบวนการแปรรูปชีวมวลจากไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นผลผลิตเหลือทิ้งทางการเกษตร ให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ ซึ่งจะมีน้ำมันทาร์เกิดขึ้นปนอยู่กับแก๊สผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยวิธีการเคลือบผงนิกเกิลซึ่งทำหน้าที่เป็นสปีชีส์ที่ว่องไว (active species) บนโดโลไมต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ ในงานวิจัยนี้เลือกโดโลไมต์มาใช้ในการทดลอง เนื่องจากมีงานวิจัยพบว่าโดโลไมต์มีคุณสมบัติในการช่วยให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันทาร์เกิดการแตกตัวได้ดี (Wang, Chang, Wu & Chen, 2005) ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ทำให้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง นอกจากนี้สภาวะที่ใช้ในการทดลอง เช่น อุณหภูมิ ชนิดสารชีวมวล ชนิดของสารป้อน ยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของ

องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ ใช้สารป้อนเป็นไอน้ำมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาฟอรัมมิงด้วย ไอน้ำ (steam reforming) และปฏิกิริยาชิฟท์ (water-gas shift) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของอนวรรตน์ เกตุคง (2547) ที่ค้นพบว่าเมื่อใช้ไอน้ำเป็นสารป้อนจะทำให้เกิด

ปฏิกิริยาฟอรัมมิงด้วยไอน้ำได้ดี จากผลงานวิจัยสรุปว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบผงนิกเกิลบนตัวรองรับโคโลไมต์มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันทาร์และปฏิกิริยาฟอรัมมิง

เอกสารอ้างอิง

- อนวรรตน์ เกตุคง. (2547). แก๊สฟีดเคชันจากไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โคโลไมต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abu El-Rub, Z., Bramer, E. A., & Brem, G. (2004). Review of catalysts for tar elimination in biomass gasification processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43, 6911-6919.
- Demirbas, A. (2002). Gaseous products from biomass by pyrolysis and gasification: effects of catalyst on hydrogen yield. *Energy Conversion Management*, 43, 897-909.
- Devi, L., & Ptasiński, K. J. (2003). A review of primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass Bioenergy*, 24, 125-140.
- Devi, L., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2005). Pretreated olivine as tar removal catalyst for biomass gasifiers: investigation using naphthalene as model biomass tar. *Fuel Processing Technology*, 86, 707-730.
- Sutton, D., Kelleher, B., & Ross, J. R. H. (2001). Review of literature on catalysts for biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 73, 155-73.
- Srinakruang, J., Sato, K., Vitidsant, T., & Fujimoto, K. (2005). A highly efficient catalyst for tar gasification with steam. *Catalyst Communication*, 6, 437-440.
- Wang, T., & Chang, J. (2005). Novel catalyst for cracking of biomass tar. *Energy Fuels*, 19, 22-27.
- Wang, T. J., Chang, J., Wu, C. Z., & Chen, Y. (2005). The steam reforming of naphthalene over a nickel dolomite cracking catalyst. *Biomass Bioenergy*, 28, 508-514.