AEC-30

แบบจำลองดุลยภาพในการคำนวณการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียด้วยกระบวนการไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่ง

An Equilibrium Model Calculation for Hydrogen Production from Exhaust Gas by Bioethanol Reforming Process

ภทรณัฐ พรหมมาศ, บุญลือ สวัสดิ์มงคล และ กัมปนาท เทียนน้อย*

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE) ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถ.ประชาราษฎร์ 1 บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*ติดต่อ: ktn@kmutnb.ac.th, kampanart.t@cit.kmutnb.ac.th โทรศัพท์: 022 555 2000 ext.6244

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อนำไปใช้ส่งเสริมการเผาไหม้และการควบคุมมลพิษในเครื่องยนต์ดีเซล โดยเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล และไบโอดีเซลผสมเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ โดยที่น้ำและออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไอเสียจากเชื้อเพลิงดังกล่าวได้ถูกนำมาเป็นสารตั้งต้นร่วมกับไบโอเอทานอลเพื่อใช้ในการคำนวณ การทดลองพิจารณาที่เครื่องยนต์มีความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ที่ภาระงานของเครื่องยนต์ต่ำ กลาง และสูง (ร้อยละ 25, 50 และ 75 ของภาระงานสูงสุด) ในการศึกษานี้ใช้ปฏิกิริยาออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่งเป็นปฏิกิริยาหลัก ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส และปฏิกิริยาออกซิเดชั่นบางส่วนเป็นปฏิกิริยาย่อย โดยพิจารณาจากแบบจำลองดุลยภาพ การคำนวณพบว่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ต่างกันจะส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจนภายใต้กระบวนการไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่ง โดยไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสมเอทานอลในอัตราส่วนเอทานอล 10% โดยปริมาตร (BE10) สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ปริมาณสูงสุด โดยเครื่องยนต์มีภาระงานร้อยละ 50 ของภาระงานสูงสุด ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งการคำนวณโดยใช้แบบจำลองดุลยภาพสามารถประเมินความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่างชนิดกันได้เป็นอย่างดี

คำหลัก: ไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่ง, ออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง, ไฮโดรเจน, รีฟอร์มมิ่งจากไอเสีย, แบบจำลองดุลยภาพ

Abstract

The aim of this research was to investigate the feasibility of hydrogen production from diesel exhaust gas to enhance combustion and exhaust aftertreatment in diesel engines. The study compared biodiesel and biodiesel-ethanol blends as engine fuel. The main composition from the exhaust gas from aforementioned fuels are include steam and oxygen, they were used as reactant in conjunction with bioethanol in the calculation which considered under engine speed at 1,500 rpm and different engine loads at low, medium, and high loads (25, 50 and 75% of maximum load). In this study, auto-thermal reforming reaction is the main reaction which includes steam reforming reaction, water gas shift and partial oxidation as partial reaction, considered by equilibrium model. The results from simulation showed

that the effect of different combustion fuels impacted on the hydrogen production via bioethanol reforming. The exhaust gas from biodiesel blended with ethanol with 10% by volume of ethanol concentration (BE10) fuel has shown the maximum reforming yields of hydrogen at medium engine load (50% load), temperature 200°C and pressure at 1 atm. The equilibrium model enables a good prediction in reforming yields of hydrogen from different combustion fuel.

***Keywords**:* Bioethanol reforming, Auto-thermal reforming, Hydrogen, Exhaust gas reforming, Equilibrium

1. บทนำ

ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนที่มีศักยภาพสูงสำหรับเครื่องยนต์ เนื่องจากไฮโดรเจนมีค่าความร้อนสูง (142.0 MJ/kg) ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงหลัก อาทิเช่น ดีเซล (45.3 MJ/kg), แก๊สโซลีน (45.8 MJ/kg), LPG (50.0 MJ/kg) และ NGV (55.5 MJ/kg) [1] และเนื่องจากไฮโดรเจนไม่มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ซึ่งส่งผลให้กลไกการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และสะอาดมาก โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเพียงน้ำเป็นองค์ประกอบ งานวิจัยที่ผ่านมา [2-4] ได้นำเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนหรือแก๊สธรรมชาติ ในเครื่องยนต์เบนซิน (Spark Ignition Engine : SI Engine) พบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ในอัตราส่วนเชื้อเพลิงที่บางลงโดยที่ปริมาณมลพิษในไอเสีย ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide : CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide : CO_2) และไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ (Unburned Hydrocarbon : UHC) มีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังมีการนำเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์ดีเซล (Compress Ignition Engine : CI Engine) ส่งผลให้เขม่า (Soot) และคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียมีปริมาณลดลง [5] และเมื่อใช้ร่วมกับระบบป้อนกลับไอเสีย (Exhaust Gas Recirculation : EGR) สามารถช่วยลดปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen : NOx) ในไอเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6-7]

ปัจจุบันการใช้งานเครื่องยนต์ดีเซลได้มีบทบาทอย่างแพร่หลายทางด้านการขนส่งและการเกษตร อันเนื่องมาจากความทนทานในการใช้งาน อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์เบนซิน กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลเป็นการเผาไหม้แบบส่วนผสมบาง ซึ่งเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของไอเสียจากการเผาไหม้ พบว่า ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินและน้ำในไอเสียเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ ซึ่งปริมาณออกซิเจนและน้ำที่เหลือจากการเผาไหม้นั้นสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมกับไบโอเอทานอลเพื่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิ่งได้ ภายใต้ปฏิกิริยาออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง (Auto-Thermal Reforming : ATR) ซึ่งประกอบด้วย ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam Reforming : SR), ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water Gas Shift : WGS) และปฏิกิริยาออกซิเดชั่นบางส่วน (Partial Oxidation : POx)

ในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งนั้นต้องการสารตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจน ได้แก่ สารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เอทานอล (Ethanol) หรือไบโอเอทานอล (Bioethanol) เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตไฮโดรเจนภายใต้กระบวนการออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง (ATR) เนื่องจากไบโอเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถผลิตได้จากพืชพลังงาน เช่น อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถเพาะปลูกได้ในประเทศไทยนอกจากนี้ไบโอเอทานอลยังสามารถนำไปใช้ผสมกับเชื้อเพลิงหลัก (เบนซิน) เพื่อลดต้นทุนของราคาน้ำมันที่สูงขึ้นสำหรับเครื่องยนต์ [8]

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อส่งเสริมการเผาไหม้และควบคุมมลพิษใน

เครื่องยนต์ดีเซล โดยทำการเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล และไบโอดีเซลผสมเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ โดยองค์ประกอบหลักของไอเสีย ได้แก่ น้ำและออกซิเจนที่ได้จากการเผาไหม้จากเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้เชื้อเพลิงดังกล่าว ได้ถูกนำมาเป็นสารตั้งต้นร่วมกับไบโอเอทานอล ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้แบบจำลองดุลยภาพ

ปฏิกิริยาออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง เป็นปฏิกิริยาที่แทบไม่ต้องการแหล่งป้อนความร้อนภายนอก เนื่องจากเกิดการส่งเสริมทางความร้อนกันเองในปฏิกิริยาย่อยโดยปฏิกิริยา รีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส เป็นปฏิกิริยาประเภทดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ส่วนปฏิกิริยาออกซิเดชั่นบางส่วน เป็นปฏิกิริยาประเภทคายความร้อน (Exothermic Reaction) กล่าวคือ ความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ และปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส ได้จากการคายความร้อนของปฏิกิริยาออกซิเดชั่นบางส่วน

สารตั้งต้นของกระบวนการไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งสำหรับผลิตไฮโดรเจน ภายใต้ปฏิกิริยาออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง (ATR) ได้แก่ ไบโอเอทานอล น้ำ และออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ (1) - (4)

$$\text{SR}: CH_3CH_2OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + H_2 \quad (1)$$

$$\text{WGS}: CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 \quad (2)$$

$$\text{POx}: CH_3CH_2OH + 3/2O_2 \rightarrow 3H_2 + 2CO_2 \quad (3)$$

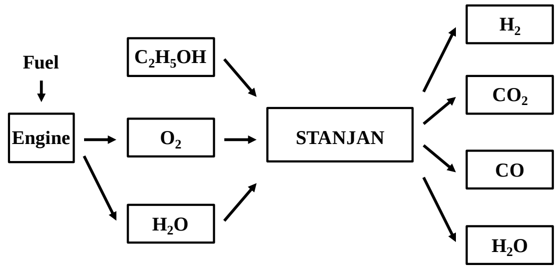
$$\text{ATR}: CH_3CH_2OH + (3-2x)H_2O + xO_2 \rightarrow 2CO_2 + (6-2x)H_2 \quad (4)$$

โดยที่ x เป็นอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อออกซิเจน [9]

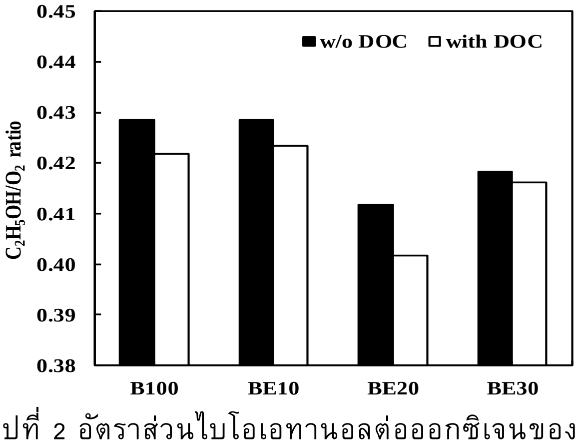
2. วิธีการวิจัย

2.1 การวิเคราะห์แผนภาพดุลยภาพ

การวิเคราะห์ดุลยภาพใช้โปรแกรม STANJAN ในการคำนวณสมดุลเคมี โดยตัวแปรที่ใช้ในคำนวณ ได้แก่ อุณหภูมิ และจำนวนโมลของสารตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วย น้ำ ออกซิเจนและไบโอเอทานอล ซึ่งไบโอเอทานอลที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.5% โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำและออกซิเจนได้จากการวัดไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ แต่ภาระงานและเชื้อเพลิงต่างกัน [10] ซึ่งแสดงในลักษณะแผนภาพดังรูปที่ 1 ในส่วนของอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการคำนวณเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่งซึ่งมีช่วงอุณหภูมิที่ประมาณ 200 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ทดลองที่ความดัน 1 บรรยากาศ และกำหนดให้แต่ละการทดลองเกิดขึ้นในลักษณะอุณหภูมิและความดันคงที่ อัตราส่วนของไบโอเอทานอลต่อออกซิเจน ($C_2H_5OH:O_2$) แสดงดังรูปที่ 2 โดยวัดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง (B100, BE10, BE20 และ BE30) ร่วมระบบบำบัดไอเสีย (DOC)



รูปที่ 1 แผนภาพการวิเคราะห์ดุลยภาพใช้โปรแกรม STANJAN



รูปที่ 2 อัตราส่วนไบโอเอทานอลต่อออกซิเจนของไอเสียจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงร่วมระบบบำบัดไอเสีย

2.2 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเพื่อนำไอเสียมาวิเคราะห์

ไอเสียจากเครื่องยนต์ที่นำมาใช้เป็นองค์ประกอบของสารตั้งต้นสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องยนต์ยี่ห้อ

YANMAR รุ่น L100V ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ขนาด 435 ซีซี เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ 86 มิลลิเมตร ระยะชัก 75 มิลลิเมตร อัตราส่วนการอัด 21:1 กำลังสูงสุด 62 กิโลวัตต์ ที่ 3,600 รอบต่อนาที

2.3 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ไบโอดีเซล (B100) และไบโอดีเซลผสมเอทานอลในอัตราส่วนโดยปริมาตรเป็น 90:10 (BE10), 80:20 (BE20) และ 70:30 (BE30) รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิง

Fuel analysis	Biodiesel	Ethanol
Cetane Number	54.7	<5
Density at 20°C (kg/m^3)	883.7	789
Viscosity at 40°C (cSt)	4.478	1.13
Boiling point (°C)	219-258	78
Aromatics (%wt)	~0	0
C(%wt)	77.2	52.17
H(%wt)	12	13.04
O(%wt)	10.8	34.79

2.4 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบไอเสีย

เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบไอเสียจะทำการวัดบริเวณทางออกจากเครื่องยนต์ และบริเวณด้านหลังดีเซลออกซิเดชั่นแคทตาลิสต์ ในการทดลองนี้ใช้เครื่องยี่ห้อ HORIBA รุ่น MEXA 584L วัดปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน และไนโตรเจนมอนอกไซด์ โดยใช้หลักการ Chemiluminescence วัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ โดยใช้หลักการ Non – Dispersive Infra-Red (NDIR) และวัดปริมาณออกซิเจนโดยใช้หลักการ Electrochemical

2.5 ปริมาณน้ำในไอเสีย

การคำนวณหาปริมาณน้ำในไอเสียสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ของปริมาณ CO และ CO_2 ดังสมการที่ (5)

$$\text{Mole fraction of } H_2O = \frac{0.5y(CO_{2(ppm)}+CO_{(ppm)})}{(CO_{(ppm)}/KCO_{2(ppm)})+1} \quad (5)$$

โดยที่ y เป็นอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนในเชื้อเพลิง และ K มีค่าคงที่เท่ากับ 3.5 [11]

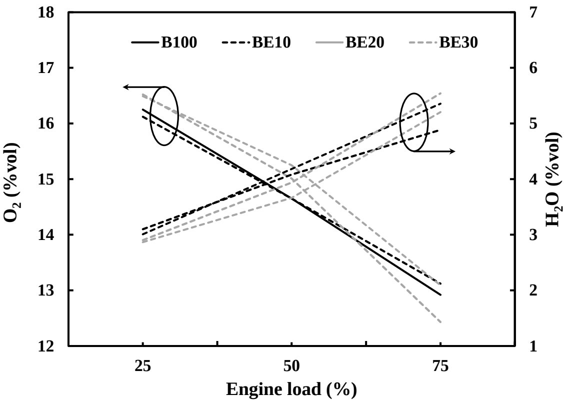
3. ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

3.1 อิทธิพลของความเร็วรอบเครื่องยนต์และภาระงานที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำและออกซิเจนในไอเสียที่ได้จากเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

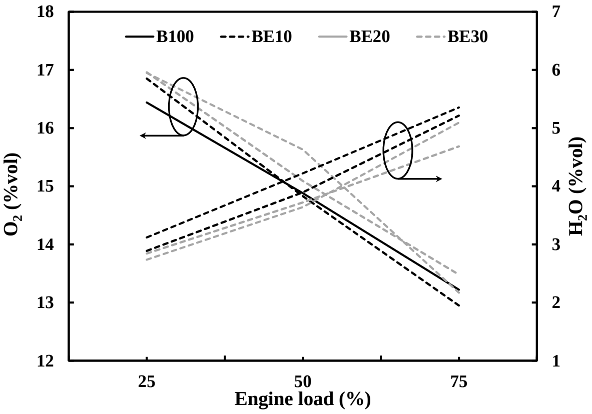
เนื่องจากเครื่องยนต์ทางการเกษตรโดยทั่วไปมีความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ 1,500 รอบต่อนาที ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกพิจารณาองค์ประกอบไอเสียและคำนวณหาปริมาณน้ำในไอเสียที่ได้จากเชื้อเพลิง B100, BE10, BE20 และ BE30 โดยเครื่องยนต์มีความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ภาระงานร้อยละ 25 50 และ 75 ของภาระงานสูงสุด ซึ่งพบว่าปริมาณองค์ประกอบของน้ำโดยรวมที่อยู่ภายในไอเสียมากสุดที่เครื่องยนต์มีภาระงานร้อยละ 75 ของภาระงานทั้งหมด ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานที่เครื่องยนต์มีภาระงานสูงสุด ปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเชื้อเพลิง B100, BE10, BE20 และ BE30 เป็นดังนี้ คือ BE30>B100>BE20>BE10 แสดงดังรูปที่ 3

ในส่วนของออกซิเจนในไอเสียซึ่งพิจารณาจากการวิเคราะห์องค์ประกอบไอเสีย โดยทั่วไปปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียจะแปรผันตรงกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ กล่าวคือ เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียจะมีอัตราส่วนที่สูงขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาภาระงานของเครื่องยนต์ พบว่ามีแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ที่ความเร็วรอบเดียวกันเมื่อภาระงานสูงขึ้นปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียที่ปลดปล่อยออกมาจะมีปริมาณที่ลดลงทั้งก่อนและหลัง

การบำบัดด้วย DOC ดังรูปที่ 3 และ 4 โดยปริมาณออกซิเจนมีค่าสูงสุดเมื่อเครื่องยนต์มีภาระงานร้อยละ 25 ของภาระงานสูงสุด ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที



รูปที่ 3 ปริมาณน้ำและออกซิเจนในไอเสียจากเชื้อเพลิง B100, BE10, BE20 และ BE30 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำและออกซิเจนในไอเสียจากเชื้อเพลิง B100, BE10, BE20 และ BE30 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที โดยไอเสียผ่านการบำบัด

เมื่อพิจารณาที่สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ร่วมกับอุปกรณ์บำบัดไปเสีย โดยในงานวิจัยนี้พิจารณาถึงไอเสียที่ผ่านการบำบัดด้วย Diesel Oxidation Catalyst (DOC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์บำบัดไอเสียที่ช่วยในการลดปริมาณมลพิษในไอเสีย ได้แก่ คาร์บอนมอนออกไซด์, และไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ จากการคำนวณองค์ประกอบของน้ำในไอเสีย พบว่าปริมาณน้ำในไอเสียมีอัตราที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำจากไอเสียที่ได้จากเครื่องยนต์โดยไม่บำบัด ปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในไอเสียสูงสุดได้จากสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณาไอเสียที่ไม่บำบัด แต่ปริมาณน้ำที่อยู่ในไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง B100>BE10>BE20>BE30 ซึ่งเป็นไปตามปริมาณส่วนผสมของเอทานอลที่ลดลง ดังรูปที่ 4

3.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการและการเกิดสารผลิตภัณฑ์

การศึกษาโดยใช้การคำนวณดุลยภาพทางเคมีในงานวิจัยนี้ กำหนดให้การผลิตไฮโดรเจนภายใต้กระบวนการไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่ง โดยมีปฏิกิริยาออโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่งเป็นปฏิกิริยาหลัก และเกิดปฏิกิริยาย่อยดังต่อไปนี้ คือ เริ่มต้นกระบวนการด้วยการเกิดปฏิกิริยาการแตกสลายของไบโอเอทานอล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาประเภทดูดความร้อนทำให้ไบโอเอทานอลแตกสลายกลายเป็นไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) และคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ดังสมการที่ 5 ในขณะเดียวกันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นบางส่วน (POx) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาประเภทคายความร้อนได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ (H_2O) คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) และความร้อน ดังสมการที่ 6 จากนั้นเกิดปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (SR) ของมีเทน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาประเภทดูดความร้อน และเกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาการแตกสลายของไบโอเอทานอล โดยดูดความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นบางส่วน ได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ดังสมการที่ 7 ในส่วนท้ายสุดเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (WGS) โดยใช้น้ำเปลี่ยนคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เป็นไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการที่ 8

Bioethanol Decomposition:

$$CH_3CH_2OH \rightarrow H_2 + CH_4 + CO \quad (5)$$

POx : $CH_3CH_2OH + 2O_2 \rightarrow 3H_2O + 2CO$ (6)

Steam Methane Reforming (SMR):

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \quad (7)$$

WGS : $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$ (8)

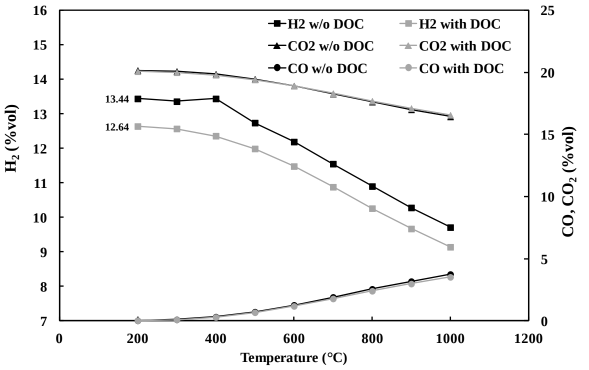
เมื่อพิจารณาจากการคำนวณ พบว่าที่ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง (200 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส) สารกำหนดปริมาณการเกิดสารผลิตภัณฑ์ คือ ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์จากการทดลองด้วยการคำนวณดุลยภาพ ประกอบด้วย ไฮโดรเจน คาร์บบอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนออกไซด์และน้ำ

3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากปฏิกิริยาไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่ง

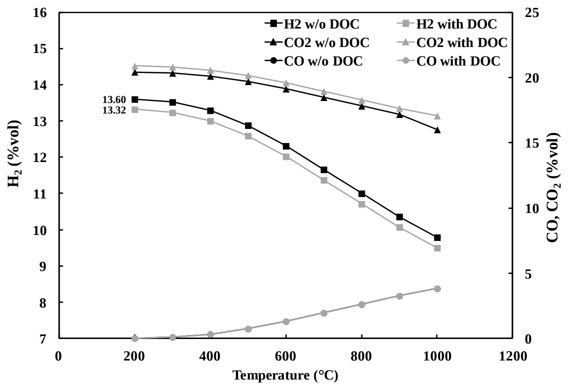
จากการพิจารณาองค์ประกอบของน้ำและออกซิเจนในไอเสีย พบว่าสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งเพื่อการผลิตไฮโดรเจน คือ สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์มีความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ภาระงานร้อยละ 50 ของภาระงานทั้งหมด เนื่องจากปริมาณน้ำและออกซิเจนในไอเสียมีค่าสูงสุด ซึ่งปริมาณน้ำและออกซิเจนในไอเสียจะมีทิศทางตรงกันข้ามกัน ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

เมื่อพิจารณาสมดุลเคมีด้วยแผนภาพดุลยภาพ พบว่าแนวโน้มของการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งซึ่งมีสารตั้งต้นประกอบด้วย ไบโอเอทานอล น้ำและออกซิเจน โดยที่สารผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนออกไซด์ เป็นไปในทิศทางเดียวกันของไอเสียจากเชื้อเพลิงทั้งหมด โดยแนวโน้มของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์จะมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และมีปริมาณที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น (300 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่ามีปริมาณต่ำสุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มขึ้นต่อเนื่องอย่างชัดเจนตามอุณหภูมิ ทั้งจากไอเสียเชื้อเพลิง B100, BE10, BE20 และ BE30 จากเครื่องยนต์และไอเสียผ่านการบำบัดด้วย DOC ดังรูปที่ 5 ถึง 8

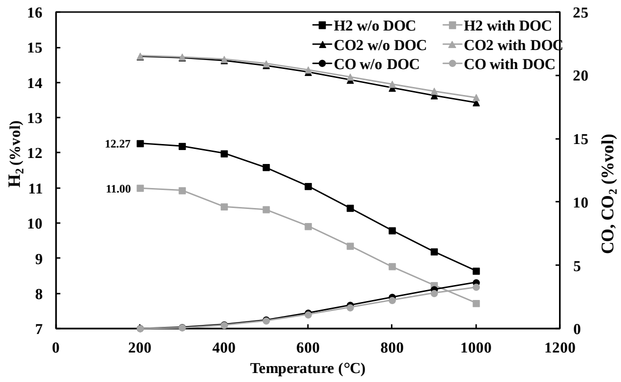
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการบำบัดไอเสียด้วย DOC พบว่าหลังจากบำบัดไอเสียดังกล่าวด้วย DOC แล้วนำมาเป็นสารตั้งต้น ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนในสารผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าปริมาณไฮโดรเจนที่ได้จากไอเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด ทั้งนี้เนื่องจากหลักการทำงานเบื้องต้นของ DOC คือ การลดปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน ด้วยการเผาไหม้ ดังนั้น ในการทำงานของ DOC จึงมีสารตั้งต้นเป็นคาร์บอนมอนออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และออกซิเจน ทำให้ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียซึ่งผ่านการบำบัดด้วย DOC มีปริมาณลดลง และเนื่องจากออกซิเจนเป็นสารกำหนดปริมาณในกระบวนการไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่ง ดังนั้น เมื่อออกซิเจนลดลงจึงทำให้ปริมาณไฮโดรเจนในสารผลิตภัณฑ์ลดลงด้วย



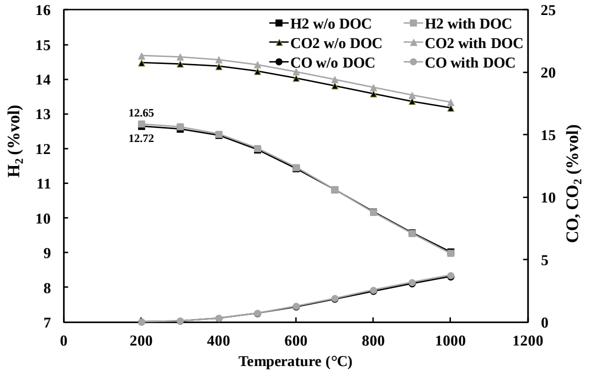
รูปที่ 5 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งโดยใช้สารตั้งต้นจากไอเสียเชื้อเพลิง B100



รูปที่ 6 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งโดยใช้สารตั้งต้นจากไอเสียเชื้อเพลิง BE10



รูปที่ 7 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งโดยใช้สารตั้งต้นจากไอเสียเชื้อเพลิง BE20



รูปที่ 8 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งโดยใช้สารตั้งต้นจากไอเสียเชื้อเพลิง BE30

4. สรุป

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อนำไปใช้ส่งเสริมการเผาไหม้และควบคุมมลพิษในเครื่องยนต์ดีเซล โดยเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมเอทานอล (B100, BE10, BE20 และ BE30) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ ที่ภาระงานร้อยละ 25, 50 และ 75 ของภาระงานสูงสุด พบว่าสภาวะของเครื่องยนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไอเสียจากเชื้อเพลิง B100, BE10, BE20 และ BE30 มาเป็นสารตั้งต้นร่วมกับไบโอเอทานอลในกระบวนการไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่ง ได้แก่ สภาวะที่เครื่องยนต์มีภาระงานร้อยละ 50 ของภาระงานทั้งหมด ที่เครื่องยนต์มีความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

จากการคำนวณโดยใช้แผนภาพดุลยภาพ พบว่าเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เพื่อนำองค์ประกอบหลักของไอเสียไปเป็นสารตั้งต้นร่วมกับไบโอเอทานอลเพื่อผลิตไฮโดรเจน ได้แก่เชื้อเพลิง BE10

อุปกรณ์บำบัดไอเสีย DOC ส่งผลต่อปริมาณไฮโดรเจนในสารผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสารกำหนดปริมาณของผลิตภัณฑ์ คือ ออกซิเจน และ DOC ใช้ออกซิเจนในการเปลี่ยนคาร์บอนมอนออกไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในไอเสียลดลง ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนในสารผลิตภัณฑ์ลดลงด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนในสารผลิตภัณฑ์กับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา พบว่าไฮโดรเจนในสารผลิตภัณฑ์มีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง จึงสามารถสรุปได้ว่า ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนภายใต้กระบวนการไบโอเอทานอลรีฟอร์มมิ่งดังกล่าว อยู่ในช่วง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลดีต่อการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากช่วงอุณภูมิที่เหมาะสมเป็นช่วงอุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล นอกจากนี้ ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ยังพบว่าเกิดปริมาณคาร์บอนมอนออกไซด์น้อยมาก

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อส่งเสริมการเผาไหม้และควบคุมมลพิษในเครื่องยนต์ดีเซล โดยเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล และไบโอดีเซลผสมเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ พบว่าการคำนวณโดยใช้แบบจำลองดุลยภาพสามารถประเมินศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่างชนิดกันได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์จากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ke L., Chunshan S., Subramani V. (2010). *Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*, John Wiley & Sons, United States of America.

[2] Emilio N., Teresa J.L, Roberto C. (2013). CO_2 emissions from a spark ignition engine operating on natural gas-hydrogen blends (HCNG), *Applied Energy*, vol.101, 2013, pp. 112-120.

[3] Akif C.M., Asok K.S., Alp K.K., Volkan O.I. (2012). Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variations in a lean-burn SI engine fueled by gasoline-hydrogen blends, *Applied Thermal Engineering*, vol. 36, 2012, pp.314-324.

[4] Osama H.G. (2013). A comparative evaluation of the performance of different fuel induction techniques for blends hydrogen-methane SI engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, 2013, pp.6848-6856.

[5] Fanos C., Athanasios M. (2013). Experimental investigation of the effects of separate hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.38, 2013, pp. 10126-10140.

[6] Buomsik S., Youngsoo Ch., Daeha, H. S., S. Kwang, M.Ch. (2011). Hydrogen effects on NOx emissions and brake thermal efficiency in a diesel engine under low-temperature and heavy-EGR conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.36, 2011, pp. 6281-6291.

[7] Toru M., Hirokazu H., Masato M., Naoya K., Hajime K., Yasuhiro, U. (2011). Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.36, 2011, pp. 13138-13149.

[8] Marina O.S.D., Adriano V.E., Silvia A.N., Rubens M.F., Carlos E.V.R., Maria, R.W.M. (2009). Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process, *Chemical Engineering Research and Design*, vol.87, 2009, pp.1206–1216.

[9] Luis, M., Gurutze, A., Pedro, M.D. (2013). *Renewable* Hydrogen Technologies production, Purification, Storage, Application and Safety, Elsevier, United States of America.

[10] ณัฐพล ผ่องราศรี และกัมปนาท เทียนน้อย (2557). อิทธิพลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงไบโอเอทานอลที่ส่งผลต่อการทางานของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮโดรคาร์บอนเอสซีอาร์ในการลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28*, AEC-109.

[11] John, B. Heywood (1988) Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Singapore.