



## การผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน Hydrogen Production from Exhaust Gas Fuel Reforming via Partial Oxidation Reaction

วารินทร์ เต็มวุฒิกุล, กัมปนาท เทียนน้อย\*

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

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันการปล่อยมลพิษจากยานยนต์และการลดปริมาณการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงได้รับความสนใจจากทั่วโลก ไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีศักยภาพในการเผาไหม้สูง โดยที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งออกซิเดชันบางส่วน โดยการใช้กระบวนการรีฟอร์มมิ่งเชื้อเพลิงจากไอเสีย ซึ่งงานวิจัยนี้จะให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานภายใต้อุณหภูมิไอเสียจริง (300-400 องศาเซลเซียส) โดยการทดลองจะใช้อ่งค์ประกอบของไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซล ที่สภาวะความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที และมีภาระงานของเครื่องยนต์ 75% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์ วัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรคาร์บอน (ไบโอดีเซล) และค่า Space velocity (SV) ที่ 13,000 และ 16,000 h<sup>-1</sup> ที่ส่งผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ จากการทดลองพบว่า SV 16,000 h<sup>-1</sup> สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ปริมาณสูงสุดถึง 15 เปอร์เซ็นต์จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งเชื้อเพลิงจากไอเสีย นอกจากนี้เมื่อนำไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากการรีฟอร์มมิ่งร่วมกับการนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่ในเครื่องยนต์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์และช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของแคตตาไลสต์ในการลดมลพิษจากอุปกรณ์บำบัดไอเสียด้วย

**คำหลัก:** ไฮโดรเจน; รีฟอร์มมิ่งออกซิเดชันบางส่วน; รีฟอร์มมิ่งจากไอเสีย; เครื่องยนต์ดีเซล

### Abstract

Nowadays, the emission for vehicles and effort for reducing fuel consumption received worldwide attention. Hydrogen is one of the most acceptable fuel that the high potential for combustion with zero emission gas. In this study, investigated of hydrogen production via partial oxidation reforming process (POx). which it concerned to exhaust gas fuel reforming process by used reforming catalyst under real engine exhaust gas temperature (300-400 °C). This experiment was conducted by using real diesel exhaust gas composition as a main reactant at engine speed 1,500 rpm and high engine load of 75 percent of maximum engine load. The main objective has investigated the effect hydrocarbon concentration (biodiesel) and space velocity (SV) (i.e. 13,000 and 16,000 h<sup>-1</sup>) on the hydrogen production. The results show that SV of 16,000 h<sup>-1</sup> has maximum hydrogen production of 15



percentage for exhaust gas fuel reforming. Moreover, the hydrogen from exhaust gas reforming can be enhance engine performance and promote aftertreatment activities in reducing exhaust gas emissions when used to application reforming exhaust gas recirculation (REGR).

**Keywords:** Hydrogen; Partial oxidation reforming; Exhaust gas fuel reforming; Diesel Engine

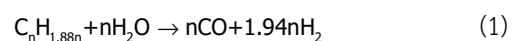
## 1. บทนำ

ความเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมทางด้านยานยนต์นำไปสู่การใช้เชื้อเพลิงที่มากขึ้น และก่อให้เกิดปัญหามลพิษในด้านต่างๆ จึงมีนโยบายและมาตรการทางกฎหมายในการควบคุมมลพิษ รวมถึงการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสิ้นเปลืองไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีศักยภาพในการเผาไหม้สูง ในงานวิจัยที่ผ่านมาไฮโดรเจนจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงสิ้นเปลือง เช่น ดีเซล แก๊สโซลีน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ภายในกระบอกสูบ และลดปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO<sub>2</sub>) และไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ (Unburned Hydrocarbon: UHC) [1-5] และเมื่อนำไฮโดรเจนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์ดีเซล ส่งผลให้อัตราการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen: NOx) และเขม่า (Soot) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [6-10] นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาภายใต้กระบวนการซีเล็กทีฟแคตตาลิสต์รีดักชัน (SCR) และดีเซลออกไซด์เซ็นแคตตาลิสต์ (DOC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการบำบัดไอเสียอีกด้วย

ข้อจำกัดของการนำไฮโดรเจนมาใช้ในยานพาหนะคือ ปัญหาทางด้านการจัดเก็บเชื้อเพลิงเนื่องจากเหตุผลด้านกฎข้อบังคับ และความปลอดภัยของยานพาหนะในการขนส่งเชื้อเพลิงบนท้องถนน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้ในการส่งเสริมการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ในยานพาหนะขณะขนส่งเพื่อลดปัญหาการ

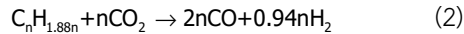
จัดเก็บ โดยใช้องค์ประกอบไอเสียจากเครื่องยนต์เป็นวัตถุดิบในการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งซึ่งเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากไฮโดรคาร์บอนในการพัฒนาเชิงพาณิชย์ เพื่อสนับสนุนการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ในอนาคต กระบวนการรีฟอร์มมิ่งประกอบด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam Reforming: SR), ปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ (Water Gas Shift: WGS) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งแห้ง (Carbon dioxide Reforming or Dry Reforming: DRR) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation Reforming: POx) และปฏิกิริยาอโต้เทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง (Auto-Thermal Reforming: ATR) [11] สารตั้งต้นของปฏิกิริยาทั้งหมดนี้เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของไอเสีย โดยจะทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรคาร์บอนที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยาดังนี้

ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการผลิตไฮโดรเจนเนื่องจากสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงในทางกลับกันปฏิกิริยานี้ต้องอาศัยพลังงานในการแยกไฮโดรเจนออกจากอะตอมของคาร์บอนสูง เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาประเภทดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ทำให้ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ (1)

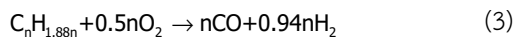


ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งแห้ง เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ แต่จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นในการผลิตร่วมกับ

ไฮโดรคาร์บอน ข้อได้เปรียบของกระบวนการนี้คือจะสามารถลดปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก แต่ข้อเสียของปฏิกริยานี้คืออัตราการเกิดไฮโดรเจนจะต่ำกว่าปฏิกริยาอื่น ดังสมการที่ (2)



ปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งออกซิเดชันบางส่วนมีข้อได้เปรียบกว่าปฏิกริยาอื่นที่ได้กล่าวมาข้างต้นคือเป็นปฏิกริยาที่ไม่จำเป็นต้องป้อนพลังงานจากภายนอก เนื่องจากเป็นปฏิกริยาประเภทคายพลังงานความร้อนทำให้เกิดพลังงานขึ้นภายในระบบ ดังสมการที่ (3)



ข้อจำกัดในการผลิตไฮโดรเจนของปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งออกซิเดชันบางส่วน คือปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการทำปฏิกริยาต้องไม่สูงเกินไป เนื่องจากออกซิเจนที่เหลือจากกระบวนการจะทำปฏิกริยากับไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ทำให้เกิดน้ำแทนที่ปริมาณไฮโดรเจน ดังสมการที่ (4)



ปฏิกริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ เป็นปฏิกริยารองที่เกิดขึ้นหลังจากการผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกริยาต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากปฏิกริยาข้างต้นนี้จะทำปฏิกริยาน้ำ ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (5)



งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิ่งผ่านปฏิกริยาออกซิเดชันบางส่วน เพื่อตรวจสอบมลพิษที่เกิดขึ้น และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ จากการนำผลิตภัณฑ์ไอเสียที่ผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิ่งกลับมาใช้ใหม่

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

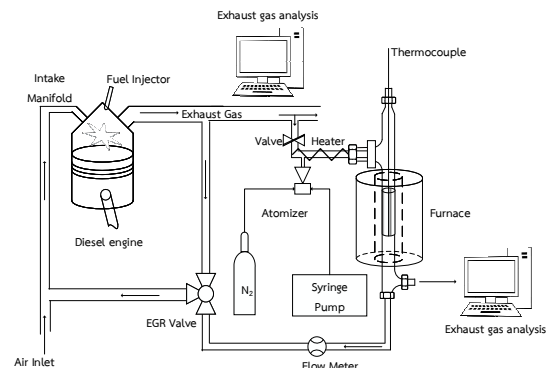
### 2.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งโดยใช้องค์ประกอบของไอเสีย

จากเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก 1 สูบ ยี่ห้อ Yanmar รุ่น L100V ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะ ขนาด 435 ซีซี เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ 86 มิลลิเมตร ระยะชัก 75 มิลลิเมตร อัตราส่วนการอัด 21:1 กำลังสูงสุด 62 กิโลวัตต์ ที่ 3,600 รอบต่อนาที โดยทำการเก็บความดันในกระบอกสูบโดยใช้เซ็นเซอร์วัดแรงดันภายในกระบอกสูบ KISTLER รุ่น 6056A แปลงสัญญาณด้วย KISTLER รุ่น 5018A โดยบันทึกค่าความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้ด้วยโปรแกรม Labviews

### 2.2 กระบวนการรีฟอร์มมิ่งจากไอเสีย

แผนภาพกระบวนการรีฟอร์มมิ่งจากไอเสียแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งตัวเร่งปฏิกริยารีฟอร์มมิ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 2 % Pt-1 % Rh-CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> / γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร ถูกติดตั้งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ที่ควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเตาไฟฟ้า ภายในเครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดความยาวของตัวเร่งปฏิกริยา ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไอเสียด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลชนิดโรตามิเตอร์ และควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกริยาด้วยไซริงค์บีบ โดยผ่านเครื่องฉีดเชื้อเพลิงซึ่งอาศัยไนโตรเจนเป็นก๊าซนำพาเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกริยารีฟอร์มมิ่ง



**2.3 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบไอเสีย**

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของไอเสียยี่ห้อ TESTO รุ่น 350 เพื่อวัดปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน และไฮโดรคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ ที่ออกมาจากเครื่องยนต์ทั้งก่อนและหลังผ่านการนำไอเสียจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งกลับมาใช้ใหม่ และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง ได้แก่ องค์ประกอบของไฮโดรเจน มีเทนและก๊าซอื่นๆจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี รุ่น GC-2014 โดยใช้หลักการการตรวจวิเคราะห์ด้วยการตรวจจับค่าการนำความร้อน (TCD)

**2.4 เงื่อนไขสถานะในการทดลอง**

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา สถานะการทำงานของเครื่องยนต์อยู่ที่ 1,500 รอบต่อนาที ที่ภาระงานของเครื่องยนต์ร้อยละ 75 ซึ่งองค์ประกอบของไอเสียแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของไอเสียในการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่ง

O <sub>2</sub> (%vol.)	13.06
H <sub>2</sub> O (%vol.)*	8.35
CO (%vol.)	0.04
CO <sub>2</sub>	5.87
HC (ppm)	781.80
NOx (ppm)	172

\*H<sub>2</sub>O เป็นค่าจากการคำนวณ

อุณหภูมิไอเสียที่ใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์อยู่ระหว่าง 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิไอเสียจากเครื่องยนต์จริง ในส่วนของอัตราการไหลของไอเสียพิจารณาที่ SV เท่ากับ 13,000 และ 16,000 h<sup>-1</sup> ดังสมการที่ (7) และมีอัตราการฉีดเชื้อเพลิงที่ 30, 35, 40 และ 45 ml h<sup>-1</sup> สุดท้ายพิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งกลับไปใช้ใน

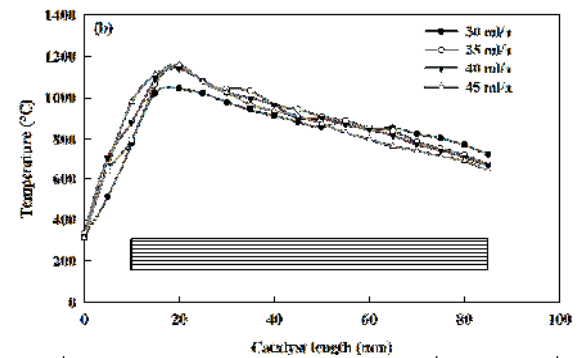
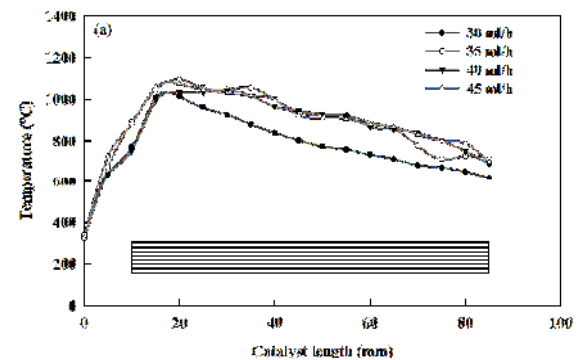
เครื่องยนต์ร่วมกับการนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์และปริมาณการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้น

$$SV = \frac{\text{Flow rate}(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})}{\text{Catalyst volume}(\text{m}^3)} \quad (7)$$

**3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล**

**3.1. อิทธิพลของ SV ที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจนจากไอเสียด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง**

จากการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง [12,13] ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนคือ SV ซึ่งอัตราการไหลของไอเสียที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา

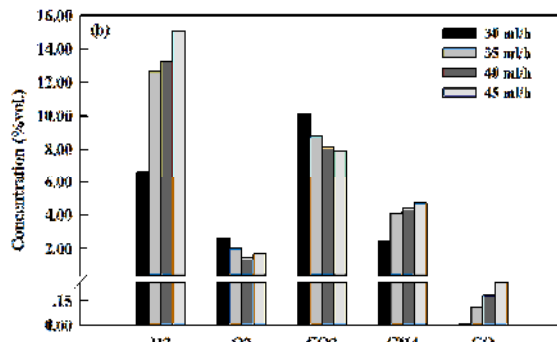
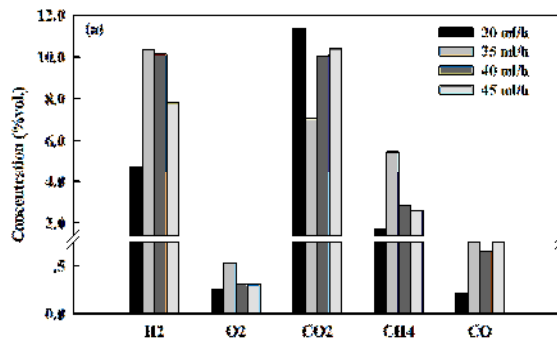


รูปที่ 2 อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ SV เท่ากับ (a) 13,000 h<sup>-1</sup> และ (b) 16,000 h<sup>-1</sup>

เมื่อพิจารณาอัตราการป้อนไฮโดรคาร์บอนสำหรับการทำปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งคงที่ พบว่า SV ที่สูงขึ้น (16,000 h<sup>-1</sup>) ช่วยส่งเสริมให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นโดย

สังเกตได้จากการกระจายตัวของอุณหภูมิ(Temperature profile) ในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าที่ SV ต่ำ เนื่องจาก SV ที่สูงขึ้นนั้นจะช่วยทำให้อัตราการป้อนของไอเสียที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สูงขึ้น [11] ซึ่งส่งผลให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดถึง 15 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการป้อนไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 45 ml/h ในขณะที่เดียวกันที่ SV เท่ากับ 13,000 h<sup>-1</sup> จะเกิดไฮโดรเจนได้สูงสุด 10 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3 แสดงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งซึ่งพบว่าการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังสมการ (1-5) คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยเนื่องจากถูกแปรสภาพดังสมการที่ (5) ก๊าซมีเทนที่พบในผลิตภัณฑ์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของการเกิดไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่ำ [11] ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (6)

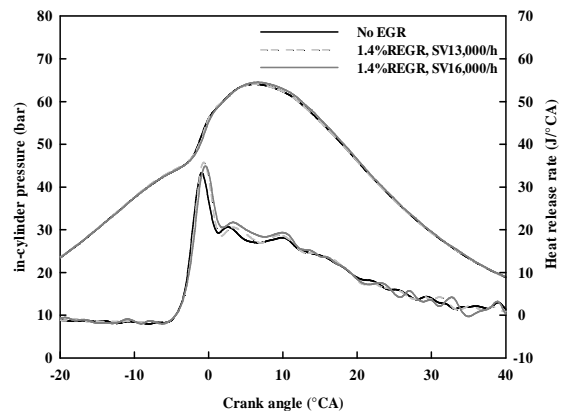
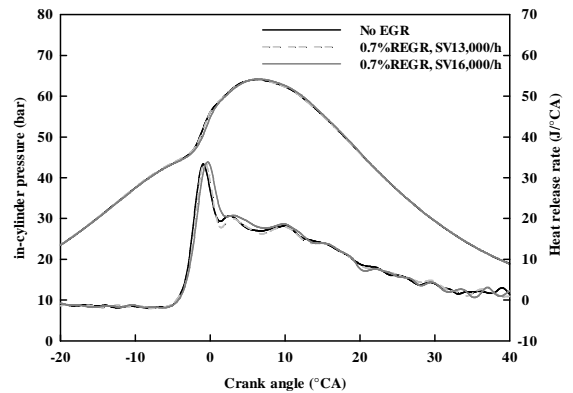


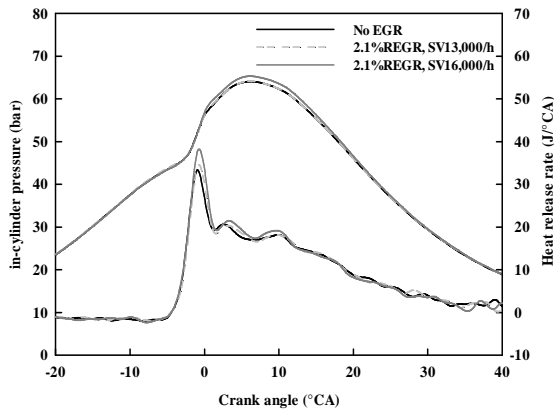
รูปที่ 3 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอเสียที่ SV เท่ากับ (a) 13,000 h<sup>-1</sup> และ (b) 16,000 h<sup>-1</sup>

เมื่อทำการวิเคราะห์ร่วมกับปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ดังตารางที่ 1 พบว่าปฏิกิริยาหลักในการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอเสียคือปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน เนื่องจากมีปริมาณของสารตั้งต้นสูงกว่าปฏิกิริยาอื่น และมีพลังงานเพียงพอในการทำให้เกิดปฏิกิริยา

### 3.2. อิทธิพลของไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์

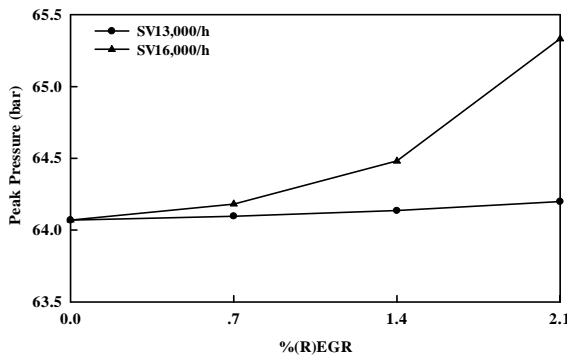
ปริมาณของไฮโดรเจนที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อประสิทธิภาพ และมลพิษของเครื่องยนต์ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง โดยเลือกใช้งานในสภาวะที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุด ซึ่งก็คือ SV ที่ 13,000 h<sup>-1</sup> ใช้อัตราการฉีดดีเซล 35 ml/h และ 16,000 h<sup>-1</sup> ใช้อัตราการฉีดดีเซล 45 ml/h ซึ่งควบคุมปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์รีฟอร์มมิ่งที่นำกลับเข้าสู่เครื่องยนต์ (REGR) ดังแสดงในรูปที่ 4





รูปที่ 4 ความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์

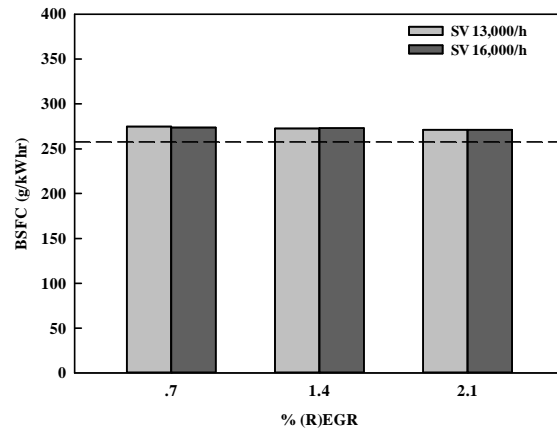
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งกลับมาใช้ใหม่ภายในห้องเผาไหม้ พบว่า ปริมาณ REGR ที่ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งที่ SV ต่ำ ( $13,000 \text{ h}^{-1}$ ) นั้นไม่ส่งผลต่อกลไกการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ REGR จะส่งเสริมการเผาไหม้โดยตรงโดยพิจารณาได้จากความดันในกระบอกสูบที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากปริมาณไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่สูงขึ้นจะส่งเสริมให้การเผาไหม้ที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 5



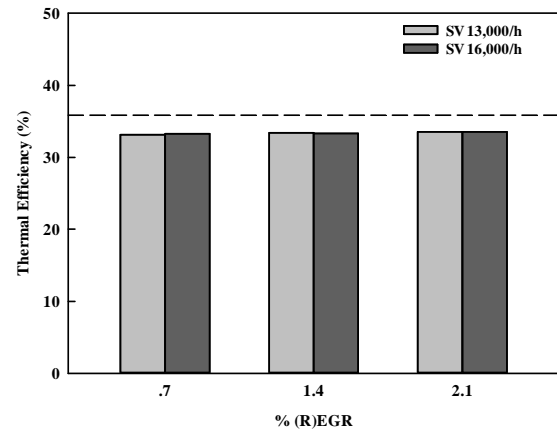
รูปที่ 5 ค่าสูงสุดของความดันภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์

เมื่อพิจารณาถึงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงพบว่า เมื่อมีการนำผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งมาใช้ในการเผาไหม้พบว่ามีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย (ร้อยละ 3) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะเครื่องยนต์ปกติดังรูปที่ 6 โดยที่ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่ SV

ต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์อย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ไม่มีการใช้งาน REGR พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์มีอัตราลดลงเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์

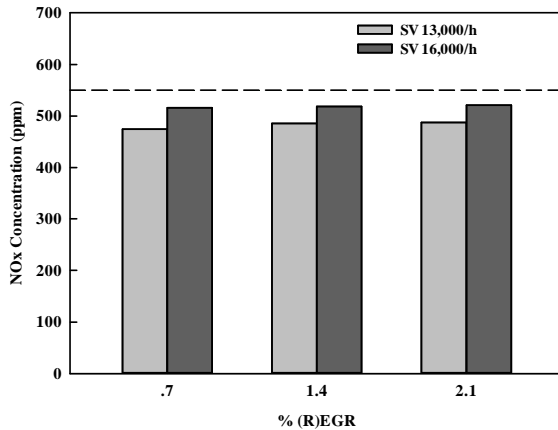


รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์

อิทธิพลของ REGR ต่อปริมาณการปลดปล่อยมลพิษจากเครื่องยนต์ พบว่าเมื่อมีการใช้ REGR ในเครื่องยนต์ส่งผลให้อัตราการลดลงของปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่สูงขึ้นตามปริมาณการป้อน REGR โดยผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ REGR ซึ่ง SV ที่  $16,000 \text{ h}^{-1}$  นั้นมีปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่สูงกว่าที่  $SV = 13,000 \text{ h}^{-1}$  ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากปริมาณไฮโดรเจนสูง (15 เปอร์เซ็นต์) ช่วยส่งเสริมการเผาไหม้โดยที่อุณหภูมิ

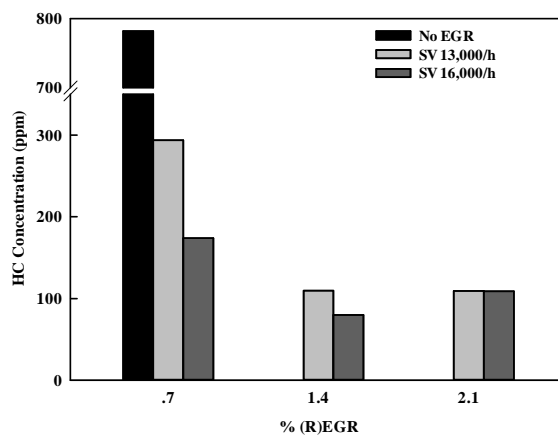


การเผาไหม้ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการทำงานของ SV ที่ 13,000 h<sup>-1</sup> อย่างไรก็ตามปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณที่ต่ำกว่าการเผาไหม้ของเครื่องยนต์โดยปกติที่ไม่ใช่ REGR ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน เมื่อนำผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งมาใช้ในเครื่องยนต์

เมื่ออัตราส่วน REGR ที่ป้อนเข้าในกระบอกสูบพบว่าปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้นั้นมีปริมาณที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (>60%) ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากปริมาณไฮโดรเจนจากผลิตภัณฑ์ของกระบวนการรีฟอร์มมิ่งช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ และปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียลดลงตามปริมาณการป้อน REGR ที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ปริมาณไฮโดรคาร์บอน เมื่อนำผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งมาใช้ในเครื่องยนต์

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งของไอเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน โดยใช้ไฮโดรคาร์บอน (เชื้อเพลิงดีเซล) เป็นสารตั้งต้นร่วมกับองค์ประกอบไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล โดยพบว่าอุณหภูมิการทำงานเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งอยู่ระหว่าง 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลโดยปกติในภาระงานของเครื่องยนต์ปานกลางไปถึงภาระงานของเครื่องยนต์ที่สูงในปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งในการผลิตไฮโดรเจน และปริมาณ SV = 16,000 h<sup>-1</sup> เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งซึ่งสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามอัตราการป้อนไฮโดรคาร์บอนเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการเกิดไฮโดรเจนโดยพบว่า ที่อัตราการป้อนไฮโดรคาร์บอน 45 ml/h ที่ SV 1600 h<sup>-1</sup> สามารถผลิตไฮโดรเจนสูงสุดถึง 15 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อไฮโดรเจนจากการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งจากไอเสียกลับมาใช้ในเครื่องยนต์ใหม่ (REGR) พบว่าส่งเสริมการเผาไหม้และช่วยลดปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน และช่วยลดปริมาณของไฮโดรคาร์บอนที่ออกมาจากเครื่องยนต์ได้อย่างเด่นชัด อย่างไรก็ตามการใช้งาน REGR ควรจะมีการปรับแต่งสภาวะการทำงานของระบบรีฟอร์มมิ่งจากไอเสียให้มีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนให้เหมาะสมในแต่ละสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์จากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rocha, H.M.Z. et al, (2016). Experimental investigation of hydrogen addition in the intake air of compressed ignition engines running on biodiesel blend, *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1-10, Nov. 2016.
- [2] Sjöström, K., Eriksson, S., and Landqvist, G., Onboard Hydrogen Generation for Hydrogen Injection into Internal Combustion Engines, SAE Technical Paper 810348, 1981, doi : 10.4271/810348.
- [3] Samuel, S. and McCormick, G., Hydrogen Enriched Diesel Combustion, SAE Technical Paper 2010-01-2190, 2010, doi:10.4271/2010-01-2190.
- [4] Lu, J. and Chen, Y., The Regeneration of Diesel Particulates Filter (DPF) with Hydrogen, SAE Technical Paper 2013-01-0090, 2013, doi:10.4271/2013-01-0090.
- [5] Saravanan, N. and Nagarajan, G., An Experimental Investigation on a Diesel Engine with Hydrogen Fuel Injection in Intake Manifold, SAE Technical Paper 2008-01-1784, 2008, doi:10.4271/2008-01-1784.
- [6] K. Theinnoi, A. Tsolakisa, S. Sitshebo, R.F. Cracknell and R.H. Clark, Fuels combustion effects on a passive mode silver/alumina HC-SCR catalyst activity in reducing NOx, *Chem. Eng. J.*, vol. 158, pp. 468-473, 2010.
- [7] A. Tsolakis, A. Megaritis and M. L. Wyszynski, Application of Exhaust Gas Fuel Reforming in Compression Ignition Engines Fueled by Diesel and Biodiesel Fuel Mixtures, *Energy & Fuel*, vol. 17, pp.1464-1473, 2003.
- [8] B. Shin, Y. Cho, D. Han, S. Song and K.M. Chun, Hydrogen effects on NOx emissions and brake thermal efficiency in diesel engine under low-temperature and heavy-EGR conditions, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol.36, pp.6281-6291, 2011.
- [9] T. Miyamoto, H. Hasegawa, M. Mikami, N. Kojima, H. Kabashima and Y. Urata, Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol.36, pp.6281-6291, 2011.
- [10] A. Tsolakis, A. Megaritis and M.L. Wyszynski, Low temperature exhaust gas fuel reforming of diesel fuel, *Fuel*, vol.38, pp. 1837-1845, 2004.
- [11] A. Tsolakis, S.E. Golunski, Sensitivity of process efficiency to reaction routes in exhaust-gas reforming of diesel fuel, *Chem. Eng. J.*, vol. 117, pp. 131-136, 2005.
- [12] D. Pagani, et al., A kinetic analysis of the partial oxidation of C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> over a 2% Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in annular microreactor, *Catal. Today.*, vol. 197, pp. 265-280, Dec. 2012.
- [13] C.S. Lau, D. Allen, A. Tsolakis, S.E. Golunski, and M.L. Wyszynski, Biogas upgrade to syngas through thermochemical recovery using exhaust gas reforming, *biomass and bioenergy.*, vol. 40, pp. 86-95, May. 2012.