ปริทัศน์ศึกษาการเพิ่มไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติอัด

Review of the Addition of Hydrogen to the Compressed Natural Gas Fuel

สราวุธ เวชกิจ[1*] เรืองเดช ปั่นด้วง[2] ณัฏฐพร พรหมกร[3] พีรายา ศิริพุฒ[4]
เยาวธีร อัชวังกุล[5] และบรรยงวุฒิ จุลละโพธิ[6]

[1]อาจารย์ [6]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม 73170
[2]วิศวกรชำนาญการพิเศษ [3]นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ [4]นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ [5]วิศวกรชำนาญการ
สำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอการรวบรวมผลศึกษา แนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติอัด หรือ Hydrogen-enriched Compressed Natural Gas (HCNG) ประเด็นเรื่องของอัตราส่วนการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับก๊าซธรรมชาติอัดที่เหมาะสมพบว่าอัตราส่วนผสมที่ให้สมรรถนะและการปล่อยไอเสียที่สมดุลย์กันจะมีเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสัดส่วน 20%-30% โดยปริมาตร โดยที่อัตราส่วนดังกล่าวยังสามารถลดอัตราส่วนสมมูลย์ลงให้อยู่ในช่วง 0.5 – 0.6 นอกจากนี้ การปรับองศาการจุดระเบิดให้ช้าลง (Ignition Delay) ประมาณ 5 องศาการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงเพื่อชดเชยความเร็วในการเผาไหม้ที่เปลี่ยนแปลงไป การใช้ HCNG ที่สัดส่วน 20%-30% โดยปริมาตรยังส่งผลทำให้สารประกอบ HC และก๊าซ NO_x ในไอ-เสียมีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซ CNG เพียงอย่างเดียว ในส่วนของการออกแบบระบบการจ่ายเชื้อเพลิงนั้น ระบบเก็บและฉีดก๊าซทั้งสองชนิดแยกจากกันจะให้ความยืดหยุ่นและทำให้สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงให้เหมาะสมต่อสภาวะการใช้งานได้ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการพัฒนาระบบดังกล่าวในเชิงพาณิชย์

Abstract

This article presents a collection of studies relating to the development of technologies using hydrogen with compressed natural gas or Hydrogen-enriched Compressed Natural Gas (HCNG). Regarding to the issues of mixing ratio, the data show that the appropriated amount of hydrogen falls between 20%-30% by volume in order to balance any tradeoff between engine performance and emissions. The equivalent ratio can be adjusted to be as low as 0.5-0.6. The ignition timingmust also be retarded (Ignition Delay) by averagely 5 degrees of crankshaft rotation to compensate for the change of burning speed. Theuse of 20%-30% of hydrogen by volume decrease both HC and NO_x as compared to the use of CNG alone. In terms of the fuel system design, the individually-stored gas injection system is of interest. It provides flexibility especially for the adjustment of the fuel composition for optimum ration in any operating conditions. But at present, there is no commercial development of such system.

คำสำคัญ :ไฮโดรเจน, ก๊าซธรรมชาติอัด, ส่วนผสมเชื้อเพลิง
Keywords :Hydrogen, Compressed Natural Gas, Fuel Mixing Ratio, HCNG

**ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ sarawoot.wat@mahidol.ac.th โทร .0 2889 2138 ต่อ 4011*

1. บทนำ

การใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงผสมร่วมกับก๊าซธรรมชาติอัดในรถยนต์นั้นมีการศึกษามายาวนานเกือบ 30 ปี เหตุผลหลักของการเลือกใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกเนื่องจากความสามารถในการเผาไหม้โดยที่อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ในช่วงส่วนผสมที่บางมาก (Ultra Lean Mixture) โดยพบว่าอัตราส่วนสมมูลย์ (Equivalent Ratio (ϕ) หรืออัตราส่วนระหว่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมพอดีตามทฤษฎี (Stoichiometric Mixture) ต่ออัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้จริง (Actual Mixture)) มีค่าต่ำถึง 0.1 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงแก๊สโซลีนหรือก๊าซมีเทนที่มีอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำสุดที่ 0.7 (Das 1990)

การศึกษาในเรื่องของการเผาไหม้ที่ส่วนผสมบางนั้น ในเอกสารทางวิชาการในเรื่องการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนนี้จะอ้างถึง การขยายขีดจำกัดการเจือจาง (Lean Limit Extension) ซึ่งหมายถึงขีดจำกัดของอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเมื่อใช้เชื้อเพลิงน้อยที่สุด หรือค่าอัตราส่วนสมมูลย์ที่ต่ำที่สุดที่เครื่องยนต์ทำงานได้ เครื่องยนต์โดยทั่วไปจะเกิดปัญหาไม่เผาไหม้ (Misfired) เมื่อมีปริมาณเชื้อเพลิงในส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเจือจางเกินไป (Hoehn and Dowdy 1974)

ประโยชน์ของการเผาไหม้ด้วยส่วนผสมบางนั้น เนื่องจากส่วนผสมที่บางจะมีปริมาณอากาศมากกว่ากรณีส่วนผสมที่พอดี จะส่งผลให้ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO และ CO_2) ในไอเสียมีปริมาณลดลง และการเผาไหม้ด้วยส่วนผสมบางจะทำให้อุณภูมิในการเผาไหม้ลดลงส่งผลทำให้ปริมาณสารประกอบประเภท NO_xหรืออ๊อกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอุณภูมิในการเผาไหม้ มีค่าลดลง (Heywood 1998)

อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงหลักยังติดปัญหาเรื่องของการเก็บเชื้อเพลิงดังกล่าวบนรถยนต์ เนื่องจากค่าความร้อนโดยปริมาตร (Volumetric Lower Heating Value) ของไฮโดรเจน มีค่าต่ำกว่ามีเทน 3 เท่า และต่ำกว่าแก๊สโซลีนเกือบ 20 เท่า ส่งผลให้ต้องมีการเก็บก๊าซไฮโดรเจนที่ปริมาณมาก (Bauer and Forest 2001, Saanum 2008, Silva and others 2008) ยังไม่นับรวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการผลิตและการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ส่งผลให้ในภาพรวมของการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนนั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยนำไฮโดรเจนไปใช้ประโยชน์โดยผสมกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์โดยคาดหวังที่จะให้ประโยชน์ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าไปเสริมกับการใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ โดยมุ่งประเด็นไปในเรื่องของการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงจากการเติมไฮโดรเจน และลดปัญหาในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงจากการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเช่นกัน (Bauer and Forest 2001, Tunsakul 2001)

ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและสรุปแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนร่วมกับเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) หรือ Hydrogen-enriched Compressed Natural Gas (HCNG) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการจ่ายเชื้อเพลิงดังกล่าวต่อผู้สนใจ โดยในหัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงปัจจัยในการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับลักษณะเฉพาะหรือคุณสมบัติในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงผสมดังกล่าว ในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงแนวทางหรือวิธีการเพื่อพัฒนาระบบการจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถใช้ได้ในรถยนต์เชิงพาณิชย์ และหัวข้อที่ 4 จะสรุปแนวทางในการพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวในภาพรวม

2. การใช้เชื้อเพลิง HCNG

ประเด็นหลักที่ได้มีการศึกษาการใช้เชื้อเพลิง HCNG ตั้งแต่ยุคเริ่มต้นได้แก่เรื่องของปริมาณหรือสัดส่วนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนต่อ CNG ทั้งนี้ การผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับ CNG จะส่งผลทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงโดยรวมมีการเปลี่ยนแปลงและส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เรื่องของการเพิ่มความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เนื่องจากความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสูงกว่าเชื้อเพลงแก๊สโซลีนและก๊าซมีเทนถึง 7 เท่า การเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะส่งผลทำให้การระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม HCNG สั้นลงกว่าการใช้ CNG ดังนั้นเครื่องยนต์จะต้องมีการปรับแต่งระยะเวลาในการจุดระเบิด (Ignition Timing) ให้เหมาะสมอีกด้วย (Bauer and Forest 2001, Tunsakul 2001) นอกจากนี้การผสมไฮโดรเจนร่วมกับ CNG ยังสามารถขยาย Lean Limit ปรับปรุงองค์ประกอบของไอเสีย สมรรถนะด้านกำลัง แรงบิด และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) (Hoehn and Dowdy 1974)

2.1 ปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนอัตราส่วนสมมูลย์และองศาการจุดระเบิด

เชื้อเพลิง CNG ถือเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกเหมาะสมในการใช้แก้ปัญหามลภาวะที่เกิดจากไอเสีย โดยเมื่อเผาไหม้จะก่อให้เกิดสารประกอบ HC และก๊าซ CO_2 ต่ำ ในขณะเดียวกันเชื้อเพลิง CNG ที่มีค่าออกเทนสูงถึง 130 ส่งผลทำให้สามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ที่ที่มีอัตราส่วนอัด (Compression Ratio) สูง โดยไม่เกิดการน๊อค (Knock) ของเครื่องยนต์ส่งผลทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีขึ้น (Bysveen 2007)

อย่างไรก็ตาม ประโยชน์ที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิง CNG โดยทั่วไปจะมุ่งเน้นในเรื่องของการลดปัญหาการปล่อยก๊าซไอเสียมากกว่าการใช้เชื้อเพลิง CNG กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดสูง เนื่องจากเครื่องยนต์แก๊สโซลีนโดยทั่วไปจะมีค่ากำลังอัดไกล้เคียงกัน นอกจากนี้ เชื้อพลิง CNG จะมีความเร็วเปลวไฟ (Flame Speed) ต่ำ ทำให้ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้มากกว่าเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง (Tansakul 2001, Kavathekar and others 2007)

การใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนผสมกับ CNG มีจุดประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และขยาย Lean Limit ที่เกิดจากการใช้ CNG อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักคือปริมาณของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เหมาะสม โดยในการศึกษาที่ผ่านมามีผลการวิเคราะห์จากการผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับ CNG โดยมีปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนตั้งแต่ 3% ถึง 50% โดยปริมาตร

Hoekstra and others (1995) ได้ดัดแปลงเครื่องยนต์ Chevrolet 350 ใช้กับเชื้อเพลิง HCNG ที่มีอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเท่ากับ 0% 11% 20% 28% และ 36% โดยปริมาตร โดยพบว่าการใช้เชื้อเพลิง HCNG สามารถลดค่าอัตราส่วนสมมูลย์จากกรณีที่ใช้ CNG เพียงอย่างเดียวซึ่งที่มีค่าเท่ากับ 0.71 เป็น 0.67 เมื่อมีเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 11% และเป็น 0.625 เมื่อเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าการเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมากกว่า 20% (ถึง 36%) ไม่สามารถทำให้เครื่องยนต์เผาไหม้ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำลงได้ การปรับองศาการจุดระเบิดเพื่อชดเชยความเร็วในการเผาไหม้ที่สูงของเชื้อเพลิงผสมมีระบุไว้เพียงการปรับเพื่อให้ได้ค่าแรงบิดของเครื่องยนต์สูงสุด

Raman and others (1994) ได้ทำการศึกษากรณีที่ปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง HCNG มีสัดส่วน 0% 5% 15% และ 30% โดยปริมาตร และทดลองกับเครื่องยนต์ GM Gen-III ขนาด 5.7 ลิตร พบว่าค่าความดันผลเฉลี่ยหรือ Brake Mean Effective Pressure (BMEP) ดีขึ้นเมื่อใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมากขึ้นเฉพาะในช่วงอัตราส่วนสมมูลย์ประมาณ 0.75 – 0.90 และได้ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำสุด 0.65 ในกรณีที่เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีปริมาณ 30% โดยปริมาตร

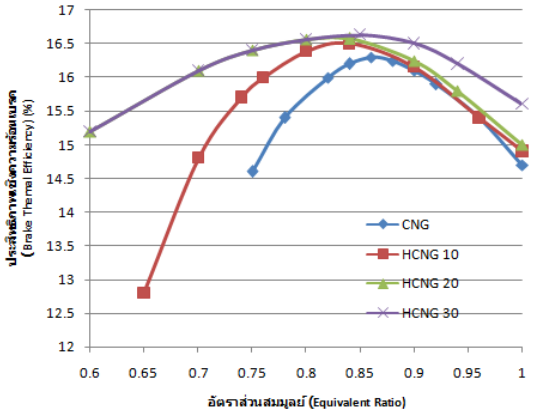
Sierens and Rosseel (2000) ได้ดัดแปลงเครื่องยนต์ Crusader T7400 (GM 454 Engine) ใช้กับเชื้อเพลิง HCNG โดยพิจารณาที่อัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเท่ากับ 10% และ 20% โดยปริมาตร พบว่า เมื่ออัตราส่วนสมมูลย์อยู่ในช่วง 0.75-0.91 การใช้เชื้อเพลิง HCNG มีส่วนช่วยเพิ่มสมรรถนะเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิง CNG และโดยเฉลี่ยส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 20% จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (Brake Thermal Efficiency) ที่ดีกว่ากรณี 10% นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 10% และ 20% สามารถทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำสุดถึง 0.65 และ 0.58 ตามลำดับ

Tunsakul (2001) ได้ดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบใช้กับก๊าซ CNG และทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์และองค์ประกอบของไอเสียในเชิงลึกจากการใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่มีปริมาณไฮโดรเจน 3% ถึง 11% โดยปริมาตร โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลย์เท่ากับ 0.6 การใช้เชื้อเพลิง HCNG มีส่วนช่วยเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ได้ 23.0%-44.4% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคสูงขึ้น 27.6%-31.4% ตามปริมาณของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น การใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำลง โดยที่ปริมาณไฮโดรเจน 11% เครื่องยนต์ทำงานได้ที่อัตราส่วนสมมูลย์ต่ำสุดถึง 0.44 อย่างไรก็ตาม กำลังและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ที่ทุกอัตราส่วนสมมูลย์ที่ต่ำกว่า 0.6 จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ Tunsakul (2001) ยังได้มีการวิเคราะห์และทดสอบผลของการปรับองศาการจุดระเบิด โดยพบว่า ที่อัตราส่วนสมมูลย์เท่ากับ 0.6 การปรับองศาการจุดระเบิดให้ช้าลง 2 – 4 องศาก่อนศูนย์ตายบน (Before-Top-Dead-Center – bTDC) ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคลดลงเล็กน้อย

การศึกษาอื่นๆยังให้ผลในทางเดียวกัน เช่น รูปที่ 1 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคกับค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่างๆ เมื่อเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง HCNG มีสัดส่วน 0% 10% 20% และ 30% โดยปริมาตร ศึกษาโดย Akansu and others (2007) ซึ่งดัดแปลงเครื่องยนต์ฟอร์ด ชนิดสี่สูบ จากรูป ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราส่วนสมมูลย์เท่ากับ 0.85 โดยเมื่อปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสูงขึ้น เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำลง ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ที่ต่ำกว่า 0.7 การผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 20% และ 30% ให้ผลไม่แตกต่างกัน ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำสุดที่ได้คือ 0.6

จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่สามารถขยาย Lean Limit ของการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ให้ต่ำลง โดยค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำสุดที่ได้จะมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โดยส่วนผสมที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ Lean Limit ดังกล่าวจะมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนประมาณ 20%-30%

Pede and others (2007) และ Ortenziet and others (2008) ได้ดัดแปลงเครื่องยนต์ IVECO ขนาด 2.8 ลิตรใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่สัดส่วนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 15% โดยปริมาตร แรงบิดของเครื่องยนต์จะมีค่าสูงสุดประมาณ 570 Nm ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลย์เท่ากับ 0.97 และเมื่ออัตราส่วนสมมูลย์มีค่าต่ำลงถึง 0.69 แรงบิดจะมีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุดประมาณ 280 Nm แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้เครื่องยนต์จะสามารถทำงานได้ด้วยการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ค่าอัตราส่วน



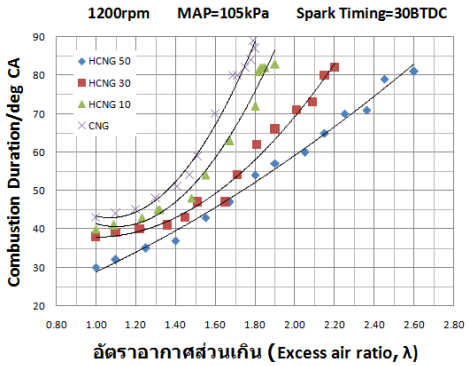
รูปที่ 1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับอัตราส่วนสมมูลย์สำหรับเชื้อเพลิงมีเทนและเชื้อเพลิงผสมไฮโดรเจนกับมีเทน (Akansu and others 2007)

สมมูลย์ต่ำ ซึ่งจะแก้ปัญหาเรื่องของมลพิษในไอเสียแต่ในขณะเดียวกันสมรรถนะของเครื่องยนต์จะต่ำลงตามไปด้วย

Bysveen (2007) เป็นอีกกรณีหนึ่งที่พิจารณาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่มีสัดส่วนเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 30% โดยปริมาตรกับเครื่องยนต์ดัดแปลง Zetor Z4901 โดยชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับองศาการจุดระเบิดให้ช้าลงเพื่อรองรับกับอิทธิพลของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ทำให้ความเร็วของเปลวไฟของเชื้อเพลิงโดยรวมสูงขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสั้นลง โดยพบว่า ในกรณีนี้จะต้องปรับองศาการจุดระเบิดให้ช้าลงประมาณ 5 องศา bTDC ตลอดช่วงการทำงานของเครื่องยนต์ ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำสุดลดลงถึง 0.5 เมื่อใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน 30%

ผลการศึกษาโดยละเอียดทั้งในเรื่องของอิทธิพลของสัดส่วนเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ระยะเวลาในการเผาไหม้ รวมถึงสมรรถนะที่เปลี่ยนแปลงไป อาจพิจารณาจากการศึกษาของ Ma and other (2007, 2008) ซึ่งได้ดัดแปลงเครื่องยนต์ 6 สูบแถวเรียง (Inline 6-Cylinder) ของบริษัท Dongfeng Motor จำกัด เพื่อทดสอบเชื้อเพลิง HCNG โดยมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 10% 30% และ 50% โดยปริมาตร รูปที่ 2 แสดงระยะเวลาการเผาไหม้ ซึ่งวัดในหน่วยขององศาเพลาข้อเหวี่ยง (Degree Crank Angle) กับอัตราอากาศส่วนเกิน (Excess Air Ratio, $\lambda=1/\phi$) โดยพบว่า เมื่อปริมาณอากาศในส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีค่าสูงขึ้น (อัตราส่วนสมมูลย์ต่ำลง หรืออัตราอากาศส่วนเกินสูงขึ้น) ส่วนผสมต้องการเวลาในการเผาไหม้มากขึ้น หากแต่ระยะเวลาของการเผาไหม้จะลดลงเมื่อมีปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในก๊าซธรรมชาติจะช่วยให้การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบมีความเร็วมากขึ้น

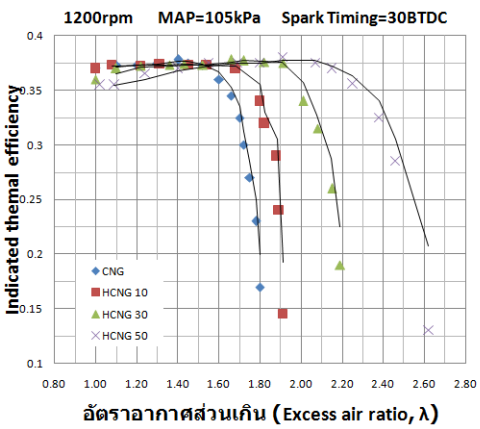
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนบ่งชี้ (Indicated thermal efficiency) กับค่าอัตราอากาศส่วนเกินโดยจะเห็นว่า ในช่วงอัตราอากาศส่วนเกินระหว่าง 1.0 ถึง 1.5 (อัตราส่วนสมมูลย์ระหว่าง 1.00 ถึง 0.67) เชื้อเพลิง



รูปที่ 2 ระยะเวลาการเผาไหม้ (0-98%) กับอัตราอากาศส่วนเกินที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ 1200 rpm (Ma and others 2007)

CNG และเชื้อเพลิง HCNG ที่ทุกสัดส่วนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะให้ค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพที่ได้รับจากเชื้อเพลิง HCNG จะสูงกว่าการใช้ CNG โดยเชื้อเพลิง HCNG ขยายขอบเขตการทำงานของเครื่องยนต์ไปในช่วงที่ค่าอัตราอากาศส่วนเกินสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หากพิจารณาค่าอัตราอากาศส่วนเกินสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้ HCNG ที่ยังคงรักษาประสิทธิภาพให้ใกล้เคียงหรือดีกว่าการใช้ CNG นั้น จากรูปจะพบว่ากรณี HCNG ที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเท่ากับ 10% 30% และ 50% จะมีค่าอัตราอากาศส่วนเกินประมาณ 1.6(อัตราส่วนสมมูลย์=0.62) 1.9(อัตราส่วนสมมูลย์=0.53) และ 2.2(อัตราส่วนสมมูลย์=0.45) ตามลำดับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการผสมไฮโดรเจนกับ CNG จะช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นโดยเฉพาะในช่วงที่มีส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงแบบบาง

การปรับองศาการจุดระเบิดเมื่อสัดส่วนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเปลี่ยนแปลงไปสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดที่ส่งผลทำให้เกิดแรงบิดต้านทานการหมุน (Brake Torque) สูงสุดกับค่าอัตรา



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนบ่งชี้กับอัตราอากาศส่วนเกินที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ 1200 rpm (Ma and others 2007)

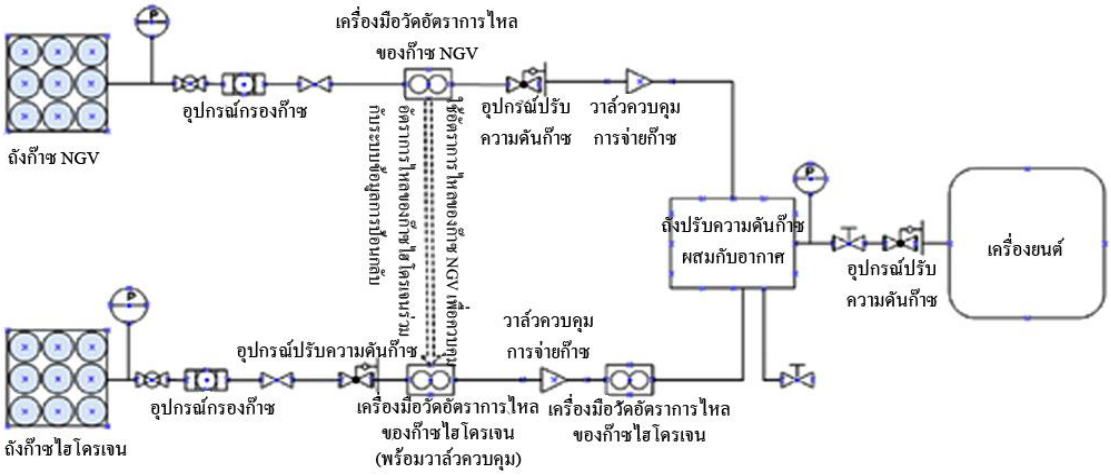
อากาศส่วนเกิน โดยพบว่าเมื่ออัตราอากาศส่วนเกินมีค่ามากขึ้น องศาการจุดระเบิดจำเป็นต้องถูกปรับให้เร็วขึ้น และเมื่อสัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมมีเปอร์เซ็นต์มากขึ้น องศาการจุดระเบิดก็จะต้องถูกปรับให้ช้าลง โดยเฉลี่ยจะลดลงประมาณ 5 - 6 องศา bTDC เมื่อสัดส่วนของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 30% โดยปริมาตร

2.2 การปล่อยก๊าซไอเสีย

ในการเผาไหม้ลดลง มีส่วนลดอุณหภูมิของการเผาไหม้ และลดการเกิดก๊าซ NO_x (Li and Karim 2005, Karner and Francfort 2003a, 2003b) และยังพบว่าสารมลพิษเหล่าจะมีค่าสูงขึ้นสำหรับการทำงานของเครื่องยนต์ที่ภาระบางส่วน (Part Load)

3 เทคโนโลยีการใช้เชื้อเพลิง HCNG

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 5 ระบบการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับก๊าซธรรมชาติอัดสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Ma and other 2007, 2008)

ผลของการผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทำให้อัตราส่วนระหว่าง H/C ในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ประกอบกับผลของการขยาย Lean Limit ซึ่งทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานที่ค่าอัตราส่วนสมมูลย์ต่ำ ทำให้การปล่อยก๊าซ CO CO_2 และสารประกอบ HC ในไอเสียมีค่าลดลงอย่างมากในกรณีของก๊าซ NO_x นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาไหม้ ซึ่งการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศมากจะทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซ NO_x ลดลงตามไปด้วย (Heywood 1988)

การศึกษาของ Hoekstra and others (1995) พบว่า NO_x จะมีค่าลดลงในขณะที่สารประกอบ HC จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสมมูลย์ลดลง และพบว่าทั้ง NO_x และสารประกอบ HC มีค่าต่ำสุดเมื่อใช้อัตราส่วนเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 36% โดยปริมาตร โดยปริมาณ NO_x และ HC ลดลงจากกรณีที่ใช้เชื้อเพลิง CNG ประมาณ 30% และ 50% ตามลำดับ ในขณะที่ Larsen and Wallace (1997) ให้ผลการศึกษาในทางเดียวกัน หากแต่พิจารณาเฉพาะกรณีที่สัดส่วนเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 15% โดยปริมาตร ทั้งนี้ในการศึกษาดังกล่าวนี้ได้ปรับลดองศาการจุดระเบิดให้ช้าลง 5 องศา bTDC ซึ่งการปรับองศาการจุดระเบิดให้ช้าลง เป็นเรื่องที่จำเป็นสำหรับเชื้อเพลิง HCNG เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นจากการเติมไฮโดรเจนร่วมกับ CNG ผลที่ได้จะทำให้ระยะเวลากับการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเพื่อเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน พบว่า สำหรับกรณีของการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซ CNG นั้น สามารถทำได้สองกรณีคือ ใช้ก๊าซผสมที่เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและก๊าซ CNG ในอัตราส่วนผสมที่ต้องการ (Karner and Francfort 2003a, 2003b, Ganesh and others 2008) หรือจะใช้ในลักษณะของการติดตั้งระบบเก็บก๊าซทั้งสองแยกกันบนรถยนต์โดยออกแบบระบบให้มีการผสมก๊าซในอัตราส่วนที่ต้องการและฉีดก๊าซที่ผสมแล้วเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์

ในขณะที่การใช้ก๊าซที่ผสมแบบเบ็ดเสร็จมาเป็นเชื้อเพลิงจะก่อให้เกิดความสะดวกทั้งในการออกแบบติดตั้งระบบจ่ายเชื้อเพลิง รวมถึงการควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง หากแต่การผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและก๊าซ CNG ในเชิงพาณิชย์ยังเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต้นทุนสูง (Veenstra and Hobein 2011) อีกทั้งจากการศึกษาตามที่ได้กล่าวมาแล้วยังพบว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่อัตราส่วนผสมของก๊าซทั้งสองที่ระดับต่างๆนั้น มีความแตกต่าง โดยความแตกต่างดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเครื่องยนต์ที่ใช้อีกด้วย จึงเป็นการยากในการระบุอัตราส่วนผสมของก๊าซที่ดีที่สุดหรือที่เหมาะสมต่อการผสมก๊าซในเชิงพาณิชย์

การจัดเก็บก๊าซ CNG และเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแยกออกจากกันนั้นเนื่องจากเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกใช้เป็นส่วนเติมของก๊าซ CNG ที่เป็นเชื้อเพลิงหลัก จึงทำให้ลดปัญหาความต้องการเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในปริมาณมาก (Silva and others 2008) อย่างไรก็ตามปัญหาหลักคือการควบคุมส่วนผสมของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและก๊าซ CNG ให้มีอัตราคงที่ตามกำหนดจ่ายให้แก่เครื่องยนต์ (Kavathekar and others 2007) เมื่อเก็บก๊าซ CNG และเชื้อเพลิงไฮโดรเจนถูกจัดเก็บแยกออกจากกัน โดยหลักการ ในขณะใช้งานต้องมีการลดความดันก่อนจะนำก๊าซทั้งสองชนิดมารวมกันในห้องปรับความดันและส่งผ่านทางท่อไอดีเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ลักษณะการจ่ายเชื้อเพลิงหลังจากการผสมในห้องปรับความดัน จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับระบบจ่ายเชื้อเพลิงของรถยนต์ที่ใช้ก๊าซ CNG เป็นเชื้อเพลิง

รูปที่ 5 แสดงแผนภาพการติดตั้งระบบการใช้ก๊าซไฮโดรเจนร่วมกับก๊าซธรรมชาติอัดเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งเป็นผลการศึกษาของ (Ma and other 2007, 2008) จากรูปจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงที่จ่ายเข้าห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ จะเป็นส่วนผสมของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซธรรมชาติอัดโดยมีระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งรับสัญญาณมาจากปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดแล้วปรับปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนให้เหมาะสมกับปริมาณของก๊าซธรรมชาติตามความต้องการจ่ายเข้าไปในถังปรับความดันก๊าซผสมกับอากาศก่อนที่จะจ่ายเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์

นอกเหนือจากการติดตั้งระบบการจัดเก็บก๊าซ การควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซทั้งสองชนิดยังเป็นเรื่องที่ต้องมีการพิจารณาทั้งนี้เนื่องจากการจ่ายก๊าซในปัจจุบันอาศัยการทำงานของชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit – ECU) ที่ควบคุมการเปิด/ปิดของหัวฉีดก๊าซทั้งนี้เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ปริมาณน้อยๆ จะต้องควบคุมการเปิด/ปิดหัวฉีดด้วยความเร็วสูง (Ganesh and others 2008) จากการคำนวนเบื้องต้นของผู้เขียนพบว่า การจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่สัดส่วน 20%-30% โดยปริมาตรนั้นจะต้องเปิดและปิดหัวฉีดก๊าซในระยะเวลาไม่เกิน 0.6 millisecond เมื่อใช้หัวฉีดก๊าซที่มีขนาดหัวฉีดเท่ากับหัวฉีดก๊าซ CNG หรือประมาณ 1.5 – 2.0 มม. โดยมีความดันในการฉีดก๊าซ 2 bar เวลาดังกล่าวยังไม่พิจารณาถึงความเฉื่อยของกลไกในการเปิด/ปิดของหัวฉีด ดังนั้น การเลือกขนาดหัวฉีด และความเร็วในการประมวลผลของชุด ECU ยังเป็นปัจจัยที่จะต้องพิจารณา หากจะพัฒนาระบบการใช้เชื้อเพลิง HCNG ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

4 สรุป

ในบทความนี้นำเสนอการรวบรวมผลศึกษา แนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนร่วมกับเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติอัด หรือ Hydrogen-enriched Compressed Natural Gas (HCNG) เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวต่อไป สำหรับปัจจัยด้านการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ส่งผลของประสิทธิภาพหรือสมรรถนะของเครื่องยนต์ ประเด็นเป็นเรื่องของอัตราส่วนการผสมกันระหว่างก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซธรรมชาติอัดที่ให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่เหมาะสม โดยจากการรวบรวมข้อมูลพบว่า การพัฒนาเทคโนโลยีการใช้เชื้อเพลิง HCNG ในอนาคตอาจมุ่งประเด็นไปที่อัตราส่วนผสมที่ให้สมรรถนะและการปล่อยไอเสียที่สมดุลย์กันคืออัตราส่วนผสม HCNG ที่มีก๊าซไฮโดรเจนสัดส่วน 20%-30% โดยปริมาตร ประเด็นในเรื่องของการศึกษาการปรับอัตราส่วนสมมูลย์ พบว่าการเพิ่มก๊าซไฮโดรเจนมีส่วนขยายขอบจำกัดความเจือจางของส่วนผสมเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ (Lean Mixture Combustion Limit) โดยการใช้ HCNG ที่สัดส่วน 20%-30% โดยปริมาตรสามารถลดอัตราส่วนสมมูลย์ระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศได้ถึง 0.5– 0.6 นอกจากนี้ การปรับองศาการจุดระเบิดยังมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีผลทำให้ความเร็วในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเร็วขึ้น การศึกษาพบว่าองศาการจุดระเบิดจะต้องถูกชะลอ (Ignition Delay) จากการใช้เชื้อเพลิง CNG เพียงอย่างเดียวประมาณ 5 องศา การหมุนเพลาข้อเหวี่ยงสำหรับการใช้ HCNG ที่สัดส่วน 20%-30% โดยปริมาตรสำหรับปัจจัยเรื่องของการปล่อยก๊าซไอเสีย พบว่าการใช้ HCNG ที่สัดส่วน 20%-30% โดยปริมาตรจะส่งผลทำให้ก๊าซ NO_x มีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซ CNG เพียงอย่างเดียว หากแต่ขึ้นอยู่กับการปรับอัตราส่วนสมมูลย์และองศาการจุดระเบิดที่เหมาะสม การศึกษาเรื่องของการออกแบบระบบการจ่ายเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการจ่ายเชื้อเพลิงที่ติดตั้งบนรถยนต์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นเรื่องหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยยังไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรณีของระบบการจ่ายเชื้อเพลิงแบบแยกเก็บก๊าซทั้งสองชนิด ผลจากการตรวจเอกสารชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อส่วนผสมของ HCNG มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นระบบการจ่ายเชื้อเพลิงแบบแยกเก็บก๊าซทั้งสองชนิดจะสามารถให้ความยืดหยุ่นและทำให้สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงให้เหมาะสมต่อสภาวะการใช้งานได้ต่อไป

5 กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านทุนวิจัยโดยสำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน และได้รับการสนับสนุนด้านความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับก๊าซไฮโดรเจน รวมถึงการสนับสนุนก๊าซไฮโดรเจนสำหรับการทดสอบจาก บริษัท บางกอก อินดัสเตรียลก๊าซ จำกัด

6 เอกสารอ้างอิง

1. Akansu SO, Kahraman N, Ceper B. 2007. **Experimental Study on a Spark Ignition Engine Fuelled by Methane-Hydrogen Mixtures**. Int J Hydrogen Energy. 32: 4279-284.
2. Bauer CG, Forest TW. 2001. **Effect of Hydrogen Addition on the Performance of Methane-Fueled Vehicles. Part I: Effect on S.I. Engine Performance**. Int J Hydrogen Energy. 26: 55-70
3. Bysveen M. 2007. **Engine Characteristics of Emissions and Performance using Mixtures of Natural Gas and Hydrogen**.Energy 32: 482-89
4. Das LM. 1990. **Hydrogen Engines: A Review of the Past and a Look into the Future**. Int J Hydrogen Energy. 15(6): 425-43
5. Ganesh RH, Subramanian V, Balasubramanian V, Mallikarjuna JM, Ramesh A, Shama RP. 2008. **Hydrogen Fueled Spark Ignition Engine with Electronically Controlled Manifold Injection: an Experimental Study**. Renewable Energy. 33(6): 1324-333
6. Heywood JB. 1988.**Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York : Wiley & Sons.
7. Hoehn FW, Dowdy MW. 1974. **Feasibility Demonstration of a Road Vehicle Fueled with Hydrogen-Enriched Gasoline**.SAE Technical Paper;Paper No. 749105.
8. Hoekstra RL, Collier K, Mulligan N, Chew L. 1995. **Experimental Study of a Clean Burning Vehicle Fuel**. Int J Hydrogen Energy. 20 (9): 737-45
9. Karner D, Francfort J. 2003. **Dodge Ram Wagon Van Hydrogen/CNG Operations Summary**. Arizona: Department of Energy (US); INEEL/EXT-03-00006
10. Karner D, Francfort J. 2003. **Hydrogen/CNG Blended Fuels Performance Testing in a Ford F-150**. Idaho: Department of Energy (US); INEEL/EXT-03-01313
11. Kavathekar KP, Rairikar SD, Thpse SS. 2007.**Development of a CNG Injection Engine Compliant to Euro-IV Norms and Development Strategy for HCNG Operation**. SAE Technical Paper; Paper No. 2007-26-029
12. Larsen JF, Wallace JS. 1997. **Comparison of Emissions and Efficiency of a Turbocharged Lean-Burn Natural Gas and Hythane-Fueled Engine**. J Eng Gas Turbines Power119(1): 218-26
13. Li H, Karim G. 2005. **Exhaust Emissions from an SI Engine Operating on Gaseous Fuel Mixtures Containing Hydrogen**. Int J Hydrogen Energy. 30(13-14):1491-499
14. Ma F, Wang Y, Liu H, Li Y, Wang J, Zhao S. 2007. **Experimental Study on Thermal Efficiency and Emission Characteristics of a Lean Burn Hydrogen Enriched Natural Gas Engine**. Int J Hydrogen Energy. 32(18): 5067-075
15. Ma F, Liu H, Wang Y, Li Y, Wang J, Zhao S. 2008.**Combustion and Emission Characteristics of a Port-injection HCNG Engine under Various Ignition Timings**. Int J Hydrogen Energy. 33(2): 816-22
16. Ortenzi F, Chiesa M, Scarcelli R, Pede G. 2008. **Experimental Tests of Blends of Hydrogen and Natural Gas in Light-Duty Vehicles**. Int J Hydrogen Energy. 33(12): 3229-225
17. Pede G, Rossi E, Chiesa M, Ortenzi F. 2007. **Test of Blends of Hydrogen and Natural Gas in a Light Duty Vehicle**.SAE Technical Paper; Paper No. 2007-01-2045
18. Raman V, Hansel J, Fulton J, Lynch F, Bruderly D. 1994. **Hythane – an Ultraclean Transportation Fuel**. Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference; 1994 June 20-24; Cocoa Beach, Florida. 3 (96): 1797 – 806
19. Saanum I. 2008. **Experimental Study of Hydrogen as a Fuel Additive in Internal Combustion Engines [Dissertation]**.Trondheim; The Norwegian University of Science and Technology. 98 p.
20. Sierens R, Rosseel E. 2000. **Variable Composition Hydrogen/Natural Gas Mixtures for Increased Engine Efficiency and Decreased Emissions**. J Eng Gas Turbines Power. 122: 135-40
21. Silva A, Carvalho L, Melo T. Frank M, Reis P, Villalobos P. 2008. **An Overview of Hydrogen Fuel for Vehicular Application**. SAE Technical Paper; Paper No. 2008-36-0322
22. Tunsakul P. 2001. **Combustion Enhancement of a Natural Gas Engine with Hydrogen [Thesis]**. Bangkok; King Mongkut's University of Technology Thonburi. 111 p. (In Thai)
23. Veenstra MJ, Hobein B. 2011. **On-Board Physical Based 70 MPa Hydrogen Storage Systems**. SAE Technical Paper; Paper No. 2011-01-1343