KKU Engineering Journal

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

การพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างก๊าซธรรมชาติอัดกับก๊าซไฮโดรเจน (HCNG) สำหรับรถบรรทุกขนาดเล็ก

Development of the on-demand fuel injection system for a light truck using the hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) fuel

สราวุธ เวชกิจ [*1)] เรืองเดช ปั่นด้วง[2)] ณัฏฐพร พรหมกร[1)] พีรายา ศิริพุฒ[1)] เยาวธีร อัชวังกุล[2)]
และ บรรยงวุฒิ จุลละโพธิ[1)]

Sarawoot Watechagit,[*1)] Ruangdet Panduang,[2)] Natthaporn Prommakorn,[1)] Peeraya Siriput,[1)] Yaowateera Achawangkul[2)] and Bunyongvut Chullabodhi[1)]

[1)] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม 73170

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakornprathom 73170, Thailand.

[2)] สำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน กรุงเทพฯ 10330

Bureau of Energy Research, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Bangkok 10330, Thailand.

Received June 2013

Accepted December 2013

บทคัดย่อ

การใช้ไฮโดรเจนในลักษณะของเชื้อเพลิงผสมร่วมกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อจุดประสงค์ในการแก้ปัญหาวิกฤติพลังงานและภาวะโลกร้อน ในบทความนี้นำเสนอผลการศึกษาออกแบบ และทดลองระบบการจ่ายเชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติอัดกับก๊าซไฮโดรเจนหรือที่มือชื่อเรียกโดยย่อว่า HCNG สำหรับรถยนต์ต้นแบบประเภทรถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์ที่ขนาดความจุ 1,809 ลูกบาศก์เซนติเมตรโดยมีลักษณะเป็นระบบที่มีการเก็บและจ่ายเชื้อเพลิงทั้งสองประเภทแยกจากกัน และเชื้อเพลิงทั้งสองประเภทจะถูกผสมกันโดยการฉีดเชื้อเพลิงทั้งสองเข้าสู่ท่อไอดีบริเวณก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (Port Injection) ด้วยสัดส่วนที่ต้องการระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดที่ใช้เป็นระบบที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป ส่วนระบบจ่ายก๊าซไฮโดรเจนถูกพัฒนามาจากระบบการจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดดังกล่าว หากแต่มีการปรับปรุงให้สามารถจ่ายก๊าซไฮโดรเจนได้ในอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซธรรมชาติอัดเท่ากับ 5% ถึง 20% โดยปริมาตร การทดสอบสมรรถนะทำโดยการทดสอบด้วย Chassis Dynamometer โดยมีการปรับอัตราส่วนผสมตั้งแต่ 0%, 5%, 10%, 15%, และ 20% และยังทดสอบเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงแก๊ซโซลีนปกติ ผลการทดสอบพบว่า สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ การใช้เชื้อเพลิง CNG หรือ HCNG นั้นกำลังและแรงบิดที่ได้ลดต่ำลงจากการใช้เชื้อเพลิงแก๊ซโซลีน และการเติมก๊าซไฮโดรเจน 10% เกิดการปรับปรุงสมรรถนะเพิ่มขึ้น 1% หากแต่การเติมการไฮโดรเจนที่สัดส่วนอื่นทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลง

คำสำคัญ : ไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติอัด จ่ายเชื้อเพลิง ส่วนผสมเชื้อเพลิง

* Corresponding author. Tel.: +6-602-889-2138 ext. 4011; fax: +6-602-441-9859 ext. 12

E-mail: sarawoot.wat@mahidol.ac.th

Abstract

The use of hydrogen as a fuel by mixing with a commercial fuel has recently been investigated continuously in order to solve the energy crisis and global warming. This article presents the results of the design and experimentation for the use of the hydrogen enriched compressed natural gas or HCNG as a fuel. The prototype vehicle a light truck equipped with a 1809 cc. gasoline engine. The proposed system is a mixing system where the compressed natural gas and the hydrogen are stored on-board and controlled separately. They are mixed as they are injected into the intake manifold right before the intake-port (Port Injection). The hydrogen supply system used in this investigation is adopted from the common system used for compressed natural gas system. The mixing ratio (%H in the total volume of HCNG) ranges from 5% to 20% by volume. The performance testing is done through the Chassis Dynamometer. The results show that the power and the torque of the engine drops when using either CNG or HCNG as compared to the gasoline fuel. However, when compared to the case when using the CNG, the 10% addition of hydrogen can increase the performance by 1%. The performance, on the other hands, is reduced for other amount of hydrogen additions.

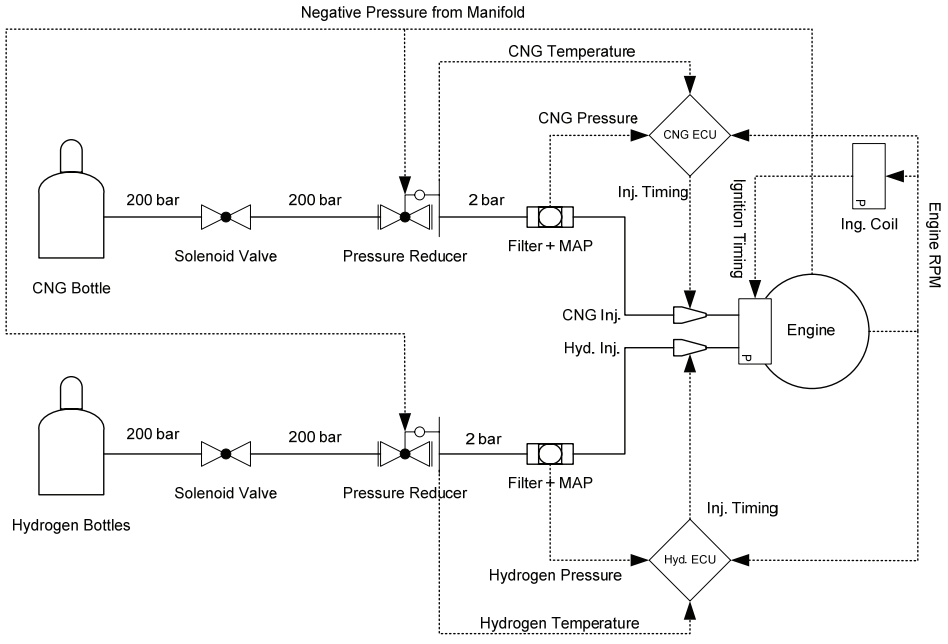
Keywords: Hydrogen, Compressed natural gas, Fuel supply, Fuel mixing ratio, Hcng

1. บทนำ

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน พบว่า ประเทศไทยมีการศึกษาการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์เป็นผลการศึกษาของฉัตรชัย หงส์อุเทน และวิทยา ยงเจริญ [1] วัชระ ลอยสมุทร [2] และขวัญชัย จ้อยเจริญ [3] การศึกษาได้ดัดแปลงระบบการจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดังกล่าวให้สามารถนำก๊าซไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้โดยตรง ผลที่ได้ทำให้รถยนต์ต้นแบบสามารถขับเคลื่อนรถยนต์ให้วิ่งในเมืองบนพื้นราบ โดยทำความเร็วสูงสุดประมาณ 103 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายในเวลา 15 วินาที และสามารถวิ่งขึ้นทางชันที่ความชันร้อยละ 10 ด้วยความเร็วเฉลี่ย 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามปัญหาของการพัฒนารถยนต์ต้นแบบดังกล่าวคือการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากการนำก๊าซไฮโดรเจนมาเผาไหม้โดยตรงในเครื่องยนต์สันดาปภายในจำเป็นต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณมาก จึงทำให้ต้องใช้ถังเก็บก๊าซขนาดใหญ่ไม่สามารถทำระยะทางได้ไกล

สำหรับกรณีของการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซธรรมชาตินั้น เป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถลดปัญหาในเรื่องของการจัดเก็บโดยทำได้สองกรณีคือ การใช้ก๊าซผสมที่เป็นส่วนผสมของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซธรรมชาติในอัตราส่วนผสมที่ต้องการหรือจะใช้ในลักษณะของการติดตั้งระบบเก็บก๊าซทั้งสองแยกจากกันบนรถยนต์ โดยระบบสามารถฉีดก๊าซทั้งสองด้วยปริมาณที่ส่งผลทำให้เกิดสัดส่วนการผสมที่ต้องการ การใช้ก๊าซที่ผสมแบบเบ็ดเสร็จนั้นจะก่อให้เกิดความสะดวกทั้งในการออกแบบติดตั้งระบบจ่ายเชื้อเพลิง รวมถึงการควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง หากแต่การผสมก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซธรรมชาติในเชิงพาณิชย์ยังเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต้นทุนสูง อีกทั้งจากการศึกษายังพบว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่อัตราส่วนผสมของก๊าซทั้งสองที่ระดับต่างๆนั้น มีความแตกต่าง โดยความแตกต่างดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเครื่องยนต์ที่ใช้อีกด้วย [4] จึงเป็นการยากในการระบุอัตราส่วนผสมของก๊าซที่ดีที่สุดหรือที่เหมาะสมต่อการผสมก๊าซในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นในโครงการนี้จึงเลือกวิธีการผสมก๊าซจากการเก็บก๊าซทั้งสองแยกจากกันบนรถยนต์

การจัดเก็บก๊าซธรรมชาติและก๊าซไฮโดรเจนแยกออกจากกันนั้น ปัญหาหลักคือการทำให้ส่วนผสมของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซธรรมชาติอัดมีอัตราส่วนผสมตามความต้องการ [5-8] ในการศึกษานี้จะได้นำเสนอระบบที่เลือกใช้ในการเก็บก๊าซทั้งสองประเภท รวมถึงวิธีการควบคุมการจ่ายก๊าซทั้งสองเพื่อให้มีอัตราส่วนผสมตามที่ต้องการ ระบบที่ออกแบบไว้ยังถูกนำไปติดตั้งบนรถยนต์ต้นแบบ ซึ่งผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 ลักษณะของระบบและสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง

2. การออกแบบระบบการจ่ายเชื้อเพลิง

ลักษณะของระบบการจ่ายเชื้อเพลิงร่วมที่เลือกใช้จะดำเนินการโดยทำการติดตั้งระบบจ่ายก๊าซทั้งสองประเภทแยกออกจากกัน ข้อดีในการออกแบบระบบการติดตั้งและจ่ายก๊าซดังกล่าวจะเป็นในส่วนของการควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซซึ่งสามารถที่จะควบคุมปริมาณก๊าซที่จ่ายเข้าเครื่องยนต์ได้อย่างอิสระต่อกัน ก๊าซที่ถูกจ่ายออกจากระบบจ่ายก๊าซทั้งสองจะถูกดูดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทันทีโดยอาศัยจังหวะการเปิดวาล์วไอดีและความดันสุญญากาศในห้องเผาไหม้ในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลง

การใช้ระบบการจ่ายก๊าซด้วยวิธีการดังกล่าวนั้น ในส่วนของระบบการจ่ายก๊าซไฮโดรเจน จะใช้ระบบท่อและระบบควบคุมรวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆของระบบการจ่ายก๊าซธรรมชาติเป็นพื้นฐาน กล่าวคือ จะทำการติดตั้งระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติ 2 ระบบ โดยระบบที่ติดตั้งเพิ่มเติมจะถูกนำมาใช้กับก๊าซไฮโดรเจนซึ่งทำให้สามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์ชุดควบคุมที่มีอยู่แล้วกับการควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนได้ทันที และจากการตรวจสอบของผู้เชี่ยวชาญพบว่า อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบการจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดนั้น สามารถนำมาใช้ในการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งหรือเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของระบบจ่ายก๊าซดังกล่าวโดยจากรูป เส้นทึบแสดงถึงระบบท่อนำก๊าซจากถังเก็บก๊าซทั้งสองระบบ ซึ่งจะถูกเก็บที่ความดันเท่ากับ 200 bar โดยประมาณ เป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดของระบบการจ่ายก๊าซธรรมชาติอัด ก๊าซจะถูกส่งผ่านโซลีนอยด์วาล์วชุดแรก ซึ่งเป็นวาล์วเพื่อความปลอดภัยโดยวาล์วจะไม่เปิดหากเครื่องยนต์ไม่ถูกสตาร์ท ก๊าซที่ความดัน 200 bar จะถูกส่งไปสู่หม้อต้มก๊าซซึ่งมีหน้าที่ลดความดันจาก 200 bar ให้ลงมาสู่ความดันทำงานของหัวฉีดที่ประมาณ 2-4 bar โดยก๊าซที่ออกจากหม้อต้มความดันจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์กรองก๊าซและถูกส่งเข้าสู่หัวฉีดก๊าซ ก๊าซจะถูกจ่ายออกจากหัวฉีดตามจังหวะการปิด/เปิดของหัวฉีดซึ่งควบคุมโดยชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับเส้นประที่แสดงในรูปที่ 1 แสดงถึงสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซ โดยสัญญาณที่ระบบควบคุมต้องการได้แก่ ระดับอุณหภูมิของก๊าซในระบบท่อ ซึ่งจะถูกวัดที่ชุดหม้อต้มก๊าซ สัญญาณแจ้งระดับความดันของก๊าซในท่อนำก๊าซ ซึ่งจะถูกวัดที่อุปกรณ์กรองก๊าซ และสัญญาณแจ้งความเร็วรอบเครื่องซึ่งวัดที่คอยล์จุดระเบิดของเครื่องยนต์ โดยในชุดระบบควบคุมจะมีตารางข้อมูลระบุค่าเวลาการเปิด/ปิดหัวฉีด ซึ่งในหลักการ

นั้น ค่าระยะเวลาการเปิด/ปิดหัวฉีดจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบเครื่องยนต์

2.1 การควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง

เพื่อให้สามารถออกแบบวิธีการควบคุมที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดของระบบที่ติดตั้งขึ้นนี้ (ข้อจำกัด เช่น การประยุกต์ใช้ชุดจ่ายก๊าซธรรมชาติทั้งระบบกับก๊าซไฮโดรเจน โดยปราศจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณการจ่ายก๊าซ) ในส่วนแรกของการออกแบบระบบควบคุม ปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดจากการทำงานของเครื่องยนต์ในช่วงต่างๆจะต้องถูกตรวจสอบและบันทึกผล ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการปรับแต่งชุดควบคุมของระบบจ่ายก๊าซของไฮโดรเจนต่อไป

การตรวจสอบปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติสามารถทำได้ทั้งด้วยวิธีการคำนวณจากทฤษฎีโดยอาศัยทฤษฎีทางเครื่องยนต์สันดาปภายใน และการจำลองแบบปัญหาบนคอมพิวเตอร์ โดยจะต้องเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของเครื่องยนต์ต้นแบบ รวมไปถึงศึกษาพฤติกรรมการไหลของก๊าซในท่อ [5] ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้ระยะเวลาในการศึกษามาก อีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้และสอดคล้องกับอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วคือการศึกษาจากข้อมูลการจ่ายเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในระบบควบคุมที่ติดตั้งมาพร้อมกับระบบจ่ายก๊าซ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการจ่ายก๊าซถูกกำหนดโดยการเปิด/ปิดหัวฉีด ที่ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อน และอาจจะไม่ใช่ค่าที่สามารถใช้ในการอ้างอิงกับเครื่องยนต์อื่นๆ หากแต่จำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะลดลงเป็นอย่างมากหากเปรียบเทียบกับการสร้างแบบจำลองของเครื่องยนต์

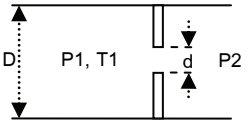
จากการตรวจสอบสัญญาณจากกล่องควบคุมการจ่ายก๊าซยี่ห้อ VERSUS โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มาพร้อมกับกล่องควบคุมพบว่า ตัวแปรที่สามารถตรวจสอบได้ประกอบไปด้วย

- ค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในหน่วยรอบต่อนาที (rpm)
- ค่าความดันของก๊าซธรรมชาติอัดภายในท่อและหม้อต้มในหน่วยบาร์ (bar)
- ระยะเวลาเปิดหัวฉีดในหน่วยหนึ่งต่อพันวินาทีหรือ millisecond (ms)
- ค่าอุณหภูมิของก๊าซธรรมชาติอัดในหม้อต้มและในถังในหน่วยองศาเซลเซียส (°C)

เมื่อทำการทดสอบเครื่องยนต์โดยเริ่มที่ 1,500 rpm และเพิ่มขึ้นที่ละ 500 rpm จนถึง 5,500 rpm (รอบเครื่องยนต์ที่ให้กำลังของเครื่องยนต์สูงสุดอยู่ที่ 5,000 rpm) ค่าตัวแปรแสดงสถานะของระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สถานะของระบบเมื่อจ่ายก๊าซ CNG

ความเร็วรอบเครื่องยนต์	ความดันท่อจ่ายก๊าซ CNG	อุณหภูมิก๊าซ CNG	ระยะเวลาเปิดหัวฉีด
(rpm)	(bar)	(°C)	(ms)
1500	2.10	37	5.44
2000	2.10	39	5.74
2500	2.09	41	5.80
3000	2.08	42	5.79
3500	2.05	45	5.72
4000	2.12	47	6.07
4500	2.11	49	5.99
5000	2.16	55	4.38
5500	2.19	56	4.81



รูปที่ 2 สมมุติฐานในการคำนวณการไหลของก๊าซ CNG

ในส่วนของปริมาณก๊าซที่จ่ายรวมถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซธรรมชาติอัดนั้น จะคำนวณจากมาตรฐาน ASME MFC-14M-2001 (Small Bore Orifice Flow Meter Calculation for Gas Flow) [9] โดยสมมุติให้การไหลของก๊าซธรรมชาติอัดผ่านหัวฉีดเป็นการไหลของก๊าซผ่านช่องเปิดแบบ Orifice ดังรูปที่ 2 และใช้ค่าตัวแปรและค่าคงที่ต่างๆในการคำนวณประกอบด้วย

- ขนาดท่อทางเดินก๊าซ (D) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm
- ขนาดช่องเปิดของหัวฉีด (d) หรือรูจ่ายก๊าซของหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 mm
- ความดันภายในท่อจ่ายก๊าซ (P1) เป็นไปตามตารางที่ 1
- อุณหภูมิของก๊าซ (T1) เป็นไปตามตารางที่ 1

ผลของการคำนวณตามมาตรฐาน ASME MFC-14M-2001 จะได้อัตราการไหลของการจ่ายก๊าซ ($\dot{Q}_{ASME}$) ในหน่วยลิตรต่อวินาที (L/sec) เมื่อหัวฉีดเปิด ซึ่งหากพิจารณาร่วมกับระยะเวลาในการเปิดหัวฉีดดังแสดงในตารางที่ 1 จะทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราการจ่ายก๊าซในแต่ละช่วงความเร็วรอบเครื่องยนต์ ตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$\dot{Q}_{CNG} = \frac{\dot{Q}_{ASME} \times t \times rpm}{2 \times 1{,}000} \qquad (1)$$

โดยที่ค่า $\dot{Q}_{CNG}$ คือค่าอัตราการไหลของก๊าซ CNG ในแต่ละช่วงความเร็วรอบเครื่องยนต์ในหน่วย L/min ค่า $\dot{Q}_{ASME}$ คือค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรเมื่อคำนวณจาก ASME MFC-14M-2001 ในหน่วย L/sec ค่า t คือค่าระยะเวลาในการเปิดหัวฉีดดังแสดงในตารางที่ 1 ในหน่วย ms ค่า rpm คือความเร็วรองเครื่องยนต์ในหน่วย rpm เลข 1,000 ใช้ปรับหน่วยของ t จาก ms ให้เป็น sec และตัวเลข 2 ใช้ปรับผลที่คำนวณได้ เนื่องจากหัวฉีดจะจ่ายก๊าซ 1 ครั้งเมื่อเครื่องยนต์หมุนสองรอบสำหรับเครื่องยนต์ 4 จังหวะ ผลจากการคำนวณตามสมการที่ (1) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของ CNG

ความเร็วรอบเครื่องยนต์	อัตราการไหลเมื่อเปิดหัวฉีด ($\dot{Q}_{ASME}$)	อัตราการไหลขณะเดินเครื่อง ($\dot{Q}_{CNG}$)	
(RPM)	(L/sec)	(L/min)	(SL/min)*
1500	1.038	16.940	32.134
2000	1.04	23.878	45.002
2500	1.043	30.247	56.492
3000	1.045	36.303	67.778
3500	1.05	42.042	77.758
4000	1.054	51.182	94.012
4500	1.056	56.929	103.992
5000	1.067	46.735	83.789
5500	1.068	56.508	101.164

* ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน 25 °C และ 1 bar

ผลจากการตรวจสอบอัตราการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในแต่ละช่วงการทำงานของเครื่องยนต์ ทำให้สามารถที่จะคาดการณ์ปริมาณการใช้ก๊าซไฮโดรเจนได้โดยอาศัยข้อมูลและวิธีการคำนวณในลักษณะเดียวกัน โดยสามารถสรุปขั้นตอนในการคำนวณได้ดังนี้

1) ใช้เงื่อนไขของความดัน อุณหภูมิ ค่าทางกายภาพของระบบหัวฉีด ระยะเวลาในการเปิด/ปิดหัวฉีด เพื่อคำนวณอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ภายใต้สมมุติฐานที่ไม่ต้องมีการปรับแต่งระยะเวลาการเปิด/ปิดหัวฉีด
2) คำนวณอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนตามมาตรฐาน ASME MFC-14M-2001
3) เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการคำนวณปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดในตารางที่ 1เพื่อตรวจสอบดูสัดส่วนผสมระว่างก๊าซทั้งสองหากไม่มีการปรับแต่งชุดควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง
4) ปรับลด/เพิ่มระยะเวลาในการจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงทั้งสองตามที่ต้องการ

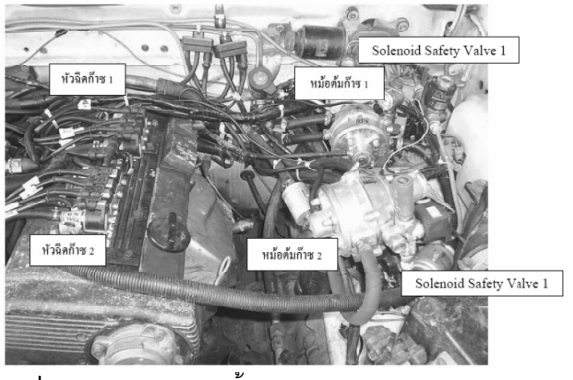
ผลจากการคำนวณในข้อ 2) พบว่า เมื่อนำชุดจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดมาใช้กับก๊าซไฮโดรเจนโดยไม่มีการปรับแต่งระยะเวลาการเปิด/ปิดหัวฉีด จะทำให้ปริมาณการไฮโดรเจนถูกจ่ายมากกว่าก๊าซธรรมชาติอัด 2.8 เท่าโดยปริมาตร ดังนั้นในทางปฏิบัตินั้นจะต้องมีการปรับลดระยะเวลาในการเปิดปิดหัวฉีดเพื่อทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนถูกปล่อยด้วยอัตราส่วน 5% 10% 15% หรือ 20% โดยปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซธรรมชาติอัดที่จ่ายต่อหน่วยเวลาดังแสดงในตารางที่ 2 ตารางที่ 3 แสดงระยะเวลาการเปิด/ปิดหัวฉัดก๊าซไฮโดรเจนจากการคำนวณที่อัตราส่วนผสมต่างๆกัน

ตารางที่ 3 ระยะเวลาเปิดหัวฉีดก๊าซไฮโดรเจน

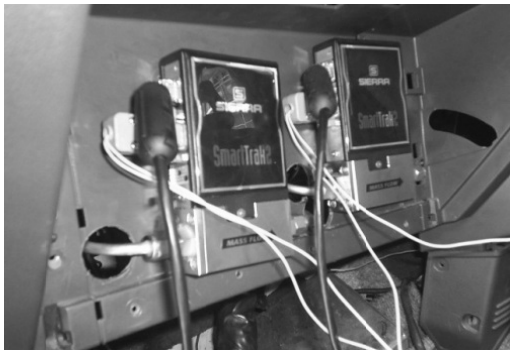
ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM)	ระยะเวลาในการเปิดหัวฉีดก๊าซต่อรอบการหมุนของเครื่องยนต์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (millisecond, ms)			
	5% HCNG	10% HCNG	15% HCNG	20% HCNG
1500	0.09	0.19	0.28	0.38
2000	0.10	0.20	0.30	0.40
2500	0.10	0.20	0.30	0.40
3000	0.10	0.20	0.30	0.40
3500	0.10	0.20	0.30	0.40
4000	0.11	0.21	0.32	0.42
4500	0.10	0.21	0.31	0.42
5000	0.08	0.15	0.23	0.30
5500	0.08	0.17	0.25	0.33

2.2 ผลการติดตั้งระบบจ่ายเชื้อเพลิง

รูปที่ 3 แสดงผลการติดตั้งระบบการจ่ายเชื้อเพลิงผสม โดยระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดที่ใช้เป็นของยี่ห้อ VERSUS ผลิตในประเทศอิตาลี นอกจากนี้ยังได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่จ่ายจริง โดยอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่ใช้เป็นของยี่ห้อ Sierra รุ่น SmartTrak 2 ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซในอุตสาหกรรม โดยสามารถวัดก๊าซที่ความละเอียดต่ำสุด 0.001 ลิตรต่อนาที และได้ถูกสอบเทียบกับการวัดอัตราการไหลของก๊าซ CNG และก๊าซไฮโดรเจนมาจากโรงงานผู้ผลิต ลักษณะการต่ออุปกรณ์ตรวจวัดในระบบแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดงผลการติดตั้งระบบจ่ายก๊าซ HCNG

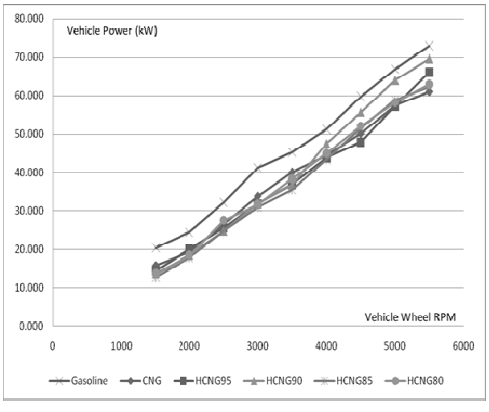


รูปที่ 4 แสดงการติดตั้ง Flow Meters

3. การทดสอบสมรรถนะ

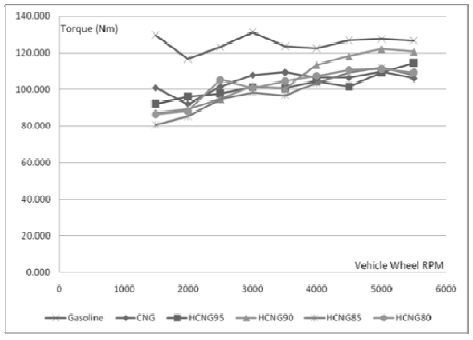
ในการศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ ตัวแปรระบุสมรรถนะที่ใช้คือกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ โดยการทดสอบจะทดสอบผ่านชุดทดสอบสมรรถนะของรถยนต์ประเภท Chassis Dynamometer ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบดังกล่าวจะเป็นค่ากำลังของเครื่องยนต์สุทธิที่หักลบการสูญเสียกำลังจากการขับเคลื่อนระบบส่งกำลัง รวมถึงการสูญเสียที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของยางรถยนต์ ซึ่งข้อดีของการทดสอบในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงกำลังของเครื่องยนต์ที่ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของรถยนต์มากกว่าการทดสอบเครื่องยนต์โดยเฉพาะ

การใช้ระบบการจ่ายก๊าซตามที่ได้ออกแบบมานั้น ทำให้สามารถควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงผสมระหว่างก๊าซธรรมชาติอัดและไฮโดรเจนได้ที่อัตราส่วนที่หลากหลาย การทดสอบทำโดยบังคับให้ระบบควบคุมจ่ายก๊าซธรรมชาติอัดเพียงอย่างเดียวที่ 100% และปรับลดปริมาณการจ่ายลง 5% จนปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติอยู่ที่ 80% โดยปริมาตร โดยบังคับให้มีการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มเติมในแต่ละค่าของการจ่ายก๊าซธรรมชาติอัด โดยให้ปริมาณการจ่ายก๊าซทั้งสองโดยรวมสุทธิมีค่า 100% โดยปริมาตร ผลการทดสอบที่แสดงจะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยจากการทดสอบจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังของเครื่องยนต์

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่ส่วนผสมต่างๆเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ CNG 100% โดยจากผลการทดสอบพบว่ากรณีที่ใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่อัตราส่วนผสม 80:20 นั้นเครื่องยนต์มีสมรรถนะใกล้เคียงกับการใช้ก๊าซ CNG 100% มากที่สุด โดยเฉลี่ยจะมีกำลังลดลง แต่ลดลงเพียง 0.11 kW และในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่อัตราส่วนผสม 90:10 นั้นเครื่องยนต์มีสมรรถนะแตกต่างจากกรณีใช้ก๊าซ CNG 100% มากที่สุด หากแต่เป็นความแตกต่างในทางที่ดีขึ้นทั้งนี้ โดยเฉลี่ยจะมีกำลังเพิ่มขึ้น 1.51 kW



รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงต่างๆ กรณีที่ใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่อัตราส่วนผสม 80:20 นั้นเครื่องยนต์มีสมรรถนะใกล้เคียงกับการใช้ก๊าซ CNG 100% มากที่สุด โดยเฉลี่ยจะมีแรงบิดกำลังลดลง แต่ลดลงเพียง 1.82 Nm และในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิง HCNG ที่อัตราส่วนผสม 90:10 นั้นเครื่องยนต์มีสมรรถนะแตกต่างจากกรณีใช้ก๊าซ CNG 100% มากที่สุด หากแต่เป็นความแตกต่างในทางที่ดีขึ้น ทั้งนี้ โดยเฉลี่ยจะมีกำลังเพิ่มขึ้น 2.17 Nm และเพื่อเป็นการทดสอบสมรรถนะในการใช้งานของรถยนต์ต้นแบบที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมในสภาวะการทำงานโดยทั่วไป ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบใช้รถยนต์ดังกล่าวบนสภาพถนนจริงเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 50 ชั่วโมง และในขณะที่การศึกษายังมุ่งประเด็นไปในเรื่องของการหาอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงร่วมที่เหมาะสม ในการทดสอบบนสภาพถนนจริง ได้ทำการทดสอบโดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมที่ต่างๆกัน ตัวแปรที่สนใจในการทดสอบคือระยะทางที่รถยนต์สามารถวิ่งได้เริ่มตั้งแต่สภาวะที่รถยนต์บรรจุก๊าซธรรมชาติอัดอยู่เต็มจนหมด และเวลาที่ใช้ในการขับขี่ จุดประสงค์หลักจะพิจารณาผลประหยัดหรือความสามารถในการปรับปรุงสมรรถนะในการขับขี่เมื่อทดสอบให้มีการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ตารางที่ 4 แสดงผลสรุปสภาวะที่ใช้ในการทดสอบบนถนนจริง โดยได้มีการทดสอบทั้งหมดเป็นเวลา 9 วันทำการ มีการขับขี่ด้วยระยะทางรวมทั้งสิ้น 3,257 กิโลเมตร รวมระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบทั้งสิ้น 54.78 ชั่วโมง

ค่าระยะทางต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในตาราง จะเปรียบเสมือนค่าแสดงความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการขับขี่จริง ซึ่งสามารถใช้แสดงระดับความแตกต่างของสภาพการขับขี่โดยเฉลี่ยในแต่ละกรณี จากตารางจะพบว่า ตัวเลขดังกล่าวจากการทดสอบในแต่ละกรณีมีค่าใกล้เคียงกันในระดับที่พอที่จะนำผลการทดสอบในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกัน นอกจากนี้ หากพิจารณาในแต่ละกรณีจะพบว่า การใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติอัดเพียงอย่างเดียวจะให้ปริมาณระยะทางต่อการวิ่ง 1 ชั่วโมงมากที่สุดคือ 63.62 กิโลเมตร ในขณะที่กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วน 90:10 จะให้ระยะทางต่อการวิ่ง 1 ชั่วโมงน้อยที่สุดคือ 56.72 กิโลเมตร ผลดังกล่าวอาจพอชี้ให้เห็นว่า อัตราเร่งที่ได้จากการทดสอบในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติอัดเพียงอย่างเดียวโดยเฉลี่ยดีที่สุด จึงส่งผลทำให้ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้สูงสุด หากแต่ข้อสรุปนี้จะไม่เป็นข้อสรุปที่ชัดเจน เนื่องจากข้อมูลการขับขี่โดยละเอียดเช่น สภาพถนน สภาพการจราจร รวมถึงสภาวะของผู้ขับขี่ เป็นข้อมูลที่บันทึกไม่ได้

หากพิจารณาถึงระยะทางและระยะเวลาที่รถยนต์สามารถขับขี่ได้ทั้งหมด การเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ 5% ได้ค่าติดลบทั้งระยะทางและเวลา หมายถึงรถยนต์ทดสอบวิ่งได้ระยะทางน้อยลงและใช้ก๊าซธรรมชาติหมดในเวลาที่เร็วขึ้น ปัญหาดังกล่าวอาจพอสรุปได้จากผลการทดสอบกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งจากรูปจะพบว่าการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ 5% เครื่องยนต์มีกำลังและแรงบิดต่ำสุด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่หากจะต้องรักษาความเร็วของรถยนต์ที่ 60-80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงนั้น ผู้ขับขี่จะต้องควบคุมเครื่องยนต์ที่รอบความเร็วเครื่องยนต์ที่สูงกว่ากรณีการใช้ก๊าซธรรมชาติอัดเพียงอย่างเดียว ซึ่งโดยปกติแล้ว การเดินเครื่องยนต์ที่รอบความเร็วที่สูงขึ้น จะทำให้มีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากขึ้น ส่งผลทำให้ได้ระยะทางและระยะเวลาที่ใช้ต่อเชื้อเพลิง 1 ถังสั้นลง อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบที่ผ่านมายังไม่มีการบันทึกข้อมูลความเร็วรอบเครื่องยนต์ในระหว่างการทดสอบ

นอกเหนือจากกรณีของการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ 5% ข้อมูลผลการทดสอบกรณีอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 ชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงผสมหรือประโยชน์ที่ได้จากการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนอย่างชัดเจน โดยเมื่อปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสัดส่วนสูงขึ้น รถยนต์จะสามารถวิ่งด้วยระยะทางที่มากขึ้นจากการเติมก๊าซธรรมชาติ 1 ถังเท่ากัน โดยรถยนต์สามารถวิ่งได้ด้วยระยะทางมากขึ้นเฉลี่ย 10%-15% ต่อการเพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 5% โดยปริมาตรในช่วงสัดส่วน 90:10 ถึง 80:20

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเมื่อขับขี่โดยใช้เชื้อเพลิงผสม

อัตราส่วน	ความเร็ว (km/hr)	ระยะทาง (km)	เวลา (hr)	ระยะทางต่อเวลา	ระยะทางที่เพิ่มขึ้น (%)	เวลาที่เพิ่มขึ้น (%)
CNG 100%	60-80	97.33	1.53	63.62	-	-
CNG 95%+H 5%	60-80	93.00	1.50	61.86	- 4.45	- 1.74
CNG 90%+H 10%	60-80	109.67	1.93	56.72	12.67	26.36
CNG 85%+H 15%	60-80	135.71	2.31	58.70	39.43	51.12
CNG 80%+H 20%	60-80	142.67	2.39	59.61	46.58	56.43
CNG 75%+H 25%	60-80	147.33	2.46	59.89	51.37	60.78

4. สรุปผลการศึกษา

รายงานการศึกษาฉบับนี้กล่าวถึงส่วนของการออกแบบระบบและการติดตั้งระบบการจ่ายเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและก๊าซธรรมชาติอัดบนรถยนต์ต้นแบบประเภทรถบรรทุกขนาดเล็ก ติดตั้งด้วยเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ขนาดความจุ 1,809 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถูกดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดโดยการติดตั้งระบบการจ่ายก๊าซแบบฉีด ในส่วนของระบบการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนเพื่อผสมกับก๊าซธรรมชาตินั้น ในการศึกษานี้ได้พิจารณาการนำระบบการจ่ายเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติโดยทั่วไปมาใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

ผลจากการศึกษาทดสอบพบว่า หากจุดประสงค์ในการใช้เชื้อเพลิงร่วมมุ่งประเด็นในส่วนของการค้นหาอัตราส่วนผสมที่ให้สมรรถนะเฉลี่ยดีที่สุด ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจะเป็นอัตราส่วนผสมเท่ากับ 90:10 หากจุดประสงค์ในการใช้เชื้อเพลิงร่วมเพื่อให้สามารถรักษาสมรรถนะของเครื่องยนต์เดิมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดให้ได้มากที่สุดตลอดช่วงการทำงานของเครื่องยนต์ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 80:20 และหากจุดประสงค์ในการใช้เชื้อเพลิงร่วมมุ่งประเด็นไปที่การประหยัดการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติอัด นั้น ผลการทดสอบขับขี่รถยนต์ต้นแบบบนสภาพถนนจริงไม่น้อยกว่า 50 ชั่วโมงแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมควรจะอยู่ที่อัตราส่วนระหว่าง 90:10 ถึง 80:20

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านทุนวิจัยโดยสำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน และได้รับการสนับสนุนด้านความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับก๊าซไฮโดรเจน รวมถึงการสนับสนุนก๊าซไฮโดรเจนสำหรับการทดสอบจาก บริษัท บางกอก อินดัสเตรียลก๊าซ จำกัด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Honguten C, Yongchareun W. Development and Modifications of a Vehicle using Hydrogen as a Fuel. Bangkok: National Research Council of Thailand; 2000. Energy Research Institute Knowledge Management. (In Thai).

[2] Loysmut W. Use of Hydrogen as Alternative Fuel in an Internal Combustion Engine [MS thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 1995. (In Thai).

[3] Choicharoen K. Application of Hydrogen as a Fuel in an Internal Combustion Engine [MS thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 1996. (In Thai).

[4] Ma F, Wang Y, Liu H, Li Y, Wang J, Zhao S. Experimental Study on Thermal Efficiency and Emission Characteristics of a Lean Burn Hydrogen Enriched Natural Gas Engine. Int J Hydrogen Energy 2007; 32(18): 5067-075.

[5] White CM, Steeper RR, Lutz AE. The Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Technical Review. Int J Hydrogen Energy 2006; 31(10): 1296-305.

[6] Ortenzi F, Chiesa M, Scarcelli R, Pede G. Experimental Tests of Blends of Hydrogen and Natural Gas in Light-Duty Vehicles. Int J Hydrogen Energy 2008; 33(12): 3229-225.

[7] Karner D, Francfort J. Hydrogen/CNG Blended Fuels Performance Testing in a Ford F-150. Idaho: Department of Energy (US); 2003 Nov. INEEL/EXT-03-01313.

[8] Bysveen M. Engine Characteristics of Emissions and Performance using Mixtures of Natural Gas and Hydrogen. Energy 2007; 32: 482-89.

[9] American Society of Mechanical Engineering (ASME). Measurement of Fluid Flow using Small Bore Precision Orifice Meters. 2001; ASME MEF-14M-2001.