บทที่ 2

ทฤษฎีเครื่องยนต์ CI และเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่

2.1 ทฤษฎีเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด CI (Compression Ignition Engine) [1]

หลักการการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด คือ ที่ปลายจังหวะอัดเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ในจังหวะที่ลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งก่อนศูนย์ตายบน (TDC) เล็กน้อย โดยเชื้อเพลิงถูกฉีดด้วยความดันสูงมากผ่าน orifice ที่ปลายหัวฉีดแล้วแตกเป็นละอองฝอยแล้วเกิดการระเหยตัวอย่างรวดเร็วและผสมกับอากาศที่มีความดันและอุณหภูมิสูงภายในกระบอกสูบ หลังจากนั้นจะเกิดการจุดระเบิดของสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศซึ่งอยู่ในสัดส่วนที่สามารถลุกติดไฟได้ (Flammability Limit) เมื่อการเผาไหม้เริ่มขึ้นความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เชื้อเพลิงส่วนที่ยังไม่เผาไหม้เกิดการระเหยและผสมกับอากาศได้และเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ถูกเผาไหม้จนหมด

จะเห็นได้ว่าหลักการการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งการเผาไหม้นี้จะสมบูรณ์หรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ สามารถแบ่งเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดตามลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงและตามการออกแบบห้องเผาไหม้ได้ 2 แบบ ดังนี้

2.1.1 แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct-Injection or DI Systems)

เป็นระบบที่มีห้องเผาไหม้แบบเปิด(open chamber) โดยเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง โมเมนตัมและพลังงานของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเพียงพอต่อการกระจายของเชื้อเพลิง และเพียงพอสำหรับการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสม จึงไม่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของอากาศเข้ามาช่วยในการผสมอีก เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ที่มีความเร็วรอบต่ำ

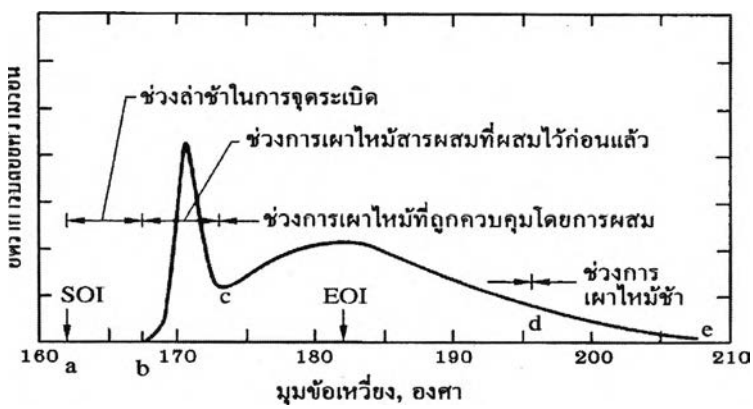
2.1.2 แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (Indirect-Injection or IDI Systems)

เป็นระบบที่ห้องเผาไหม้ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ห้องเผาไหม้ล่วงหน้า (pre-chamber) และห้องเผาไหม้หลัก (main-chamber) โดยเชื้อเพลิงจะถูกฉีดผ่านทางหัวฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ซึ่งจะจุดระเบิดและเผาไหม้เชื้อเพลิงบางส่วนภายในห้องเผาไหม้ล่วงหน้านี้ หลังจากนั้นเปลวไฟจะลามออกมาที่ห้องเผาไหม้หลักซึ่งอยู่เหนือหัวลูกสูบและเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือต่อไปจนสิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้ ระบบนี้เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ขนาดเล็กความเร็วรอบสูง

ของสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ปรากฏการณ์ของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

อัตราการปล่อยความร้อน (Heat-Release Rate, HRR) มีความสำคัญสำหรับการอธิบายปรากฏการณ์ของการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ ซึ่งความร้อนที่ปล่อยออกมานี้มาจากพลังงานทางเคมีของเชื้อเพลิงที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการการเผาไหม้ อัตราการปล่อยความร้อนถูกควบคุมโดยสารผสมที่พร้อมสำหรับการเผาไหม้ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการแตกเป็นละอองฝอย (Atomization) ข องเชื้อเพลิง, การระเหย (Vaporization) ของเชื้อเพลิง, การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (Fuel-Air Mixing) และการเกิดเปลวไฟครั้งแรก (pre-flame chemical reaction) ของกระบวนการการเผาไหม้ซึ่งแบ่งออกได้ 4 ช่วง คือ ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด, ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกันก่อนแล้ว, ช่วงการเผาไหม้ที่ควบคุมโดยการผสมและช่วงการเผาไหม้ช้า ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดไม่ว่าห้องเผาไหม้จะเป็นแบบใดและสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์จะเช่นใดก็ตาม กระบวนการการปล่อยความร้อนจะประกอบด้วย 4 ช่วงนี้เสมอ ซึ่งทุกช่วงถูกควบคุมโดยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกันไปในแต่ละช่วง สามารถแสดงช่วงต่างๆ ในกระบวนการเผาไหม้ได้ด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยความร้อนกับองศาข้อเหวี่ยง(Crank Angle) ดังรูปที่ 2-1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงอัตราการปล่อยความร้อนในเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (DI)



รูปที่ 2-1 แสดงอัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงและช่วงต่างของการเผาไหม้ (SOI:Start of injection, EOI:End of injection) [1]

จากกราฟในรูปที่ 2-1 สามารถอธิบายกราฟตามช่วงต่างๆ ได้ดังนี้

- ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition delay, a-b)

คือ ช่วงเวลาระหว่างเริ่มต้นฉีดเชื้อเพลิง (SOI, Start of injection) เข้าสู่ห้องเผาไหม้จนถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้

- ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกันก่อนแล้ว (Premixed combustion, b-c)

คือ ช่วงเวลาของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ผสมกันก่อนแล้วในช่วงล่าช้าการจุดระเบิดและอยู่ในสัดส่วนที่สามารถเกิดการลุกติดไฟได้ จะเกิดการเผาไหม้พร้อมกันอย่างรวดเร็วจึงให้ผลของอัตราการปล่อยความร้อนที่สูง

- ช่วงการเผาไหม้ที่ควบคุมโดยการผสม (Mixing combustion, c-d)

คือ ช่วงการเผาไหม้ที่อัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยอัตราการเกิดของสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่พร้อมจะเผาไหม้ โดยอัตราการปล่อยความร้อนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่อาจจะไม่สูงถึงค่าแรกแล้วจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

- ช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, d-e)

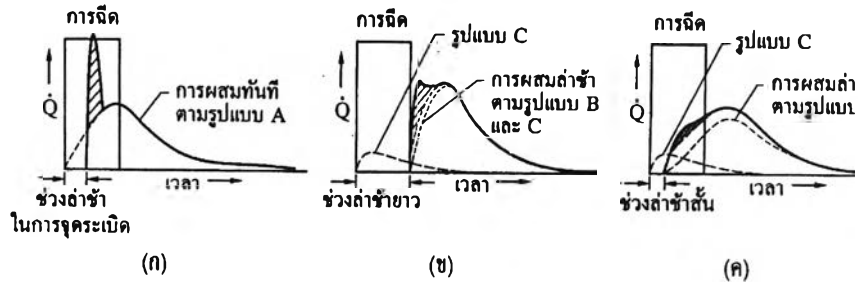
คือ ช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่น้อยและเป็นการเผาไหม้ในส่วนของเขม่าที่เกิดจากส่วนผสมหนาที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้

สำหรับระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M และระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (IDI) นั้นอัตราการปล่อยความร้อนจะต่างจากระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงตามรูปที่ 2-2 โดยสามารถแบ่งรูปแบบของการเผาไหม้ตามกลไกต่างๆ คือ กลไกหรือรูปแบบการฉีด, การผสมเชื้อเพลิงกับอากาศและการเผาไหม้ของสารผสมของเครื่องยนต์ดี 3 รูปแบบ คือ

รูปแบบ A เกิดจากการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปทันทีโดยโมเมนตัมที่มากเพียงพอสำหรับการผสมทันทีของเชื้อเพลิงกับอากาศ ซึ่งได้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed) ดังรูปที่ 2-2 (ก)

รูปแบบ B เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดปะทะกับผนังห้องเผาไหม้ การผสมในช่วงล่าช้าเกือบจะไม่มีเนื่องจากการระเหยของเชื้อเพลิงถูกจำกัด แต่หลังจากการจุดระเบิดการระเหยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกควบคุมโดยอัตราการผสม (โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้กับผนังซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงระเหยเร็วขึ้น) และจะเกิดการผสมในแนวรัศมีจากแรงหนีศูนย์กลางที่ต่างกันดังรูปที่ 2-2 (ข)

รูปแบบ C เชื้อเพลิงถูกกระจายไปใกล้กับผนัง และมีการผสมเกิดในช่วงล่าช้าแต่ในอัตราที่น้อยกว่าแบบ A เมื่อเกิดการจุดระเบิดจะเกิดการผสมขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับรูปแบบ B ดังรูปที่ 2-2 (ค)



รูปที่ 2-2 แสดงการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล 3 แบบ [1]

(ก) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ใช้หัวฉีดแบบหลายรู ติดไว้ตรงกลาง

(ข) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M ที่ฉีดเชื้อเพลิงเข้าผนัง

(ค) แสดงอัตราการเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมที่ใช้ห้องเผาไหม้ล่วงหน้าแบบไหลวน

จากรูปที่ 2-2 (ก) แสดงอัตราการปล่อยความร้อนที่ต่างกันจากการเผาไหม้ของระบบการฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ใช้หัวฉีดแบบหลายรูติดตั้งไว้ตรงกลาง, รูปที่ 2-2 (ข) แสดงการฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M และ รูปที่ 2-2 (ค) แสดงการฉีดโดยอ้อมที่ใช้ห้องเผาไหม้ล่วงหน้าแบบไหลวน

สำหรับเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะมีลักษณะการผสมและเผาไหม้ตามรูปแบบ A ส่วนระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบ M นั้นจะมีลักษณะการผสมและเผาไหม้ตามรูปแบบ B และ C ซึ่งจะช่วยให้อัตราการเผาไหม้ในช่วงแรกไม่สูงเกินไป ส่วนระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมช่วงล่าช้าการจุดระเบิดจะสั้นหลังจากนั้นเป็นลักษณะการผสมและเผาไหม้ตามรูปแบบ C

2.3 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดระบบเชื้อเพลิงคู่ [2], [3], [4]

กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่จะแตกต่างจากเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป เนื่องจากในจังหวะอัดของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่จะเป็นการอัดของส่วนผสมของอากาศและก๊าซ ส่วนผสมจะถูกอัดจนมีอุณหภูมิและความดันที่สูงหลังจากนั้น น้ำมันดีเซลจะถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้และจุดระเบิดนำร่องให้กับการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ ในขั้นตอนนี้ถือว่ามีลักษณะเหมือนเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ (Spark ignition engine) ที่การใช้การฉีดนำร่องเป็น Ignition source เสมือนการใช้หัวเทียน

การใช้เครื่องยนต์ทำงานแบบระบบเชื้อเพลิงคู่นั้นมีทั้งจุดเด่นและจุดด้อย จุดเด่นที่สำคัญคือ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในส่วนผสมของอากาศและก๊าซ ทำให้การทำงานของ

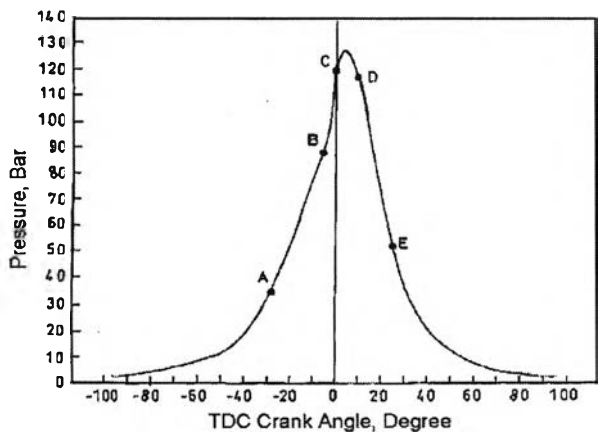
เครื่องยนต์มีลักษณะคล้ายกับวัฏจักรออตโต (Otto cycle) ซึ่งมีสมมติฐานว่าความร้อนที่ปล่อยจากกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นที่ปริมาตรคงที่ ดังนั้นจึงได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะโดยทั่วไปวัฏจักรออตโตจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าวัฏจักรดีเซลที่อัตราส่วนกำลังอัดเท่ากัน สำหรับจุดด้อยของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่ คือการน็อกซึ่งคล้ายกับกรณีเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

2.3.1 ผลของการใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่เปรียบเทียบกับใช้น้ำมันดีเซลปกติในเครื่องยนต์แบบ Indirect Injection [4]

เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่ (Dual fuel) ระหว่างก๊าซกับน้ำมันดีเซลจะมีสมรรถนะและประสิทธิภาพที่แตกต่างจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซล ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซลที่มีระบบการฉีดเชื้อเพลิงเป็นแบบ indirect injection เท่านั้น

2.3.1.1 กระบวนการในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซล

กระบวนการในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลจะแบ่งเป็น 4 ช่วงหลักๆ ดังนี้ ช่วง A-B Ignition delay phase, ช่วง B-C Premixed combustion phase, ช่วง C-D Mixing-controlled combustion phase และช่วง D-E Late combustion phase ดังแสดงในรูปที่ 2-3



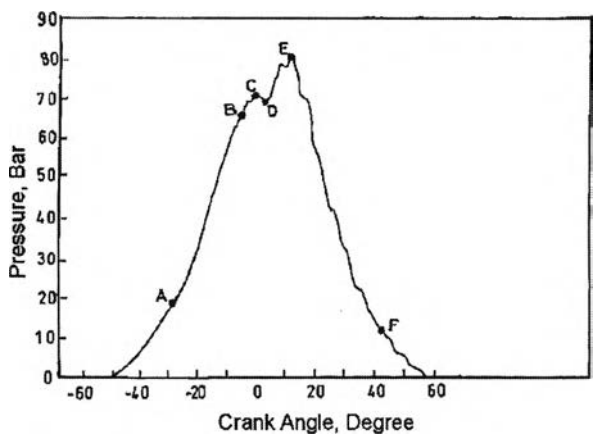
รูปที่ 2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับองศาข้อเหวี่ยงภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล [4]

ช่วง A-B เป็นช่วงระยะเวลาตั้งแต่เริ่มฉีดน้ำมันเข้าไปยังห้องเผาไหม้จนถึงจุดที่เริ่มมีการเผาไหม้, ช่วง B-C เป็นช่วงที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศเหมาะสมจากช่วง Ignition delay จะเกิดการเผาไหม้ขึ้นทำให้ความดันและอุณหภูมิภายใน

ห้องเผาไหม้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว, ช่วง C-D เป็นช่วงที่การเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยอัตราในการแตกตัวของเชื้อเพลิง, การระเหยของเชื้อเพลิง, อัตราการผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศและการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง, ช่วง D-E เป็นช่วงที่การเผาไหม้ช้า ซึ่งเริ่มลดต่ำลงโดยเกิดขึ้นในช่วงจังหวะขยาย ทำให้ความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดต่ำลงจนการเผาไหม้สิ้นสุดลง

2.3.1.2 กระบวนการเผาไหม้ของระบบเชื้อเพลิงคู่

กระบวนการเผาไหม้ของระบบเชื้อเพลิงคู่จะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 5 ช่วงหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-4 ดังนี้ ช่วง A-B Pilot ignition delay, ช่วง B-C Pilot premixed combustion, ช่วง C-D Primary fuel ignition delay, ช่วง D-E Rapid combustion of primary fuel และช่วง E-F Diffusion combustion stage



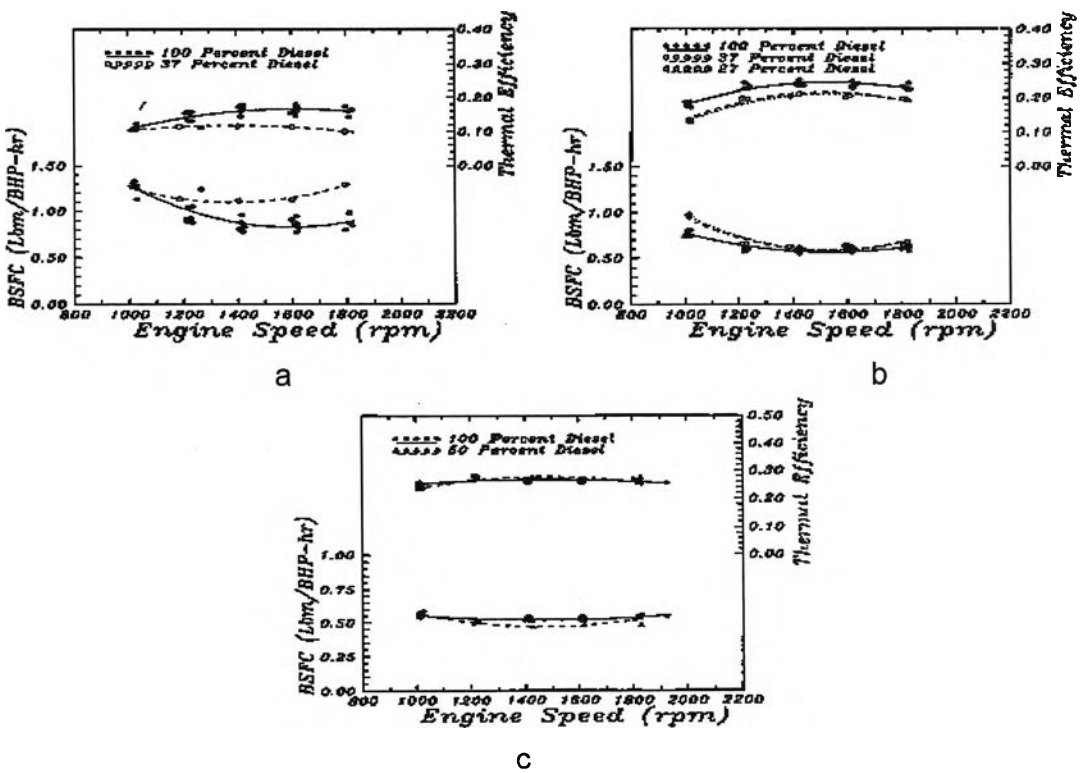
รูปที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับองศาข้อเหวี่ยงภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่ [4]

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียวจะพบว่าช่วง Ignition delay (A-B) ของระบบเชื้อเพลิงคู่จะยาวกว่าเนื่องจากในห้องเผาไหม้จะมีปริมาณของก๊าซออกซิเจนลดลงจากการที่มีก๊าซธรรมชาติเข้ามาแทนที่ทำให้อุณภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นช้าลงส่งผลให้น้ำมันที่ถูกฉีดเข้ามาระเหยได้ยาก ทำให้ระยะเวลาที่น้ำมันจะระเหยให้ได้อัตราส่วนผสมพอดีเพื่อจุดระเบิดนานขึ้นและถึงจุดที่ระเบิดช้าลง, ในช่วง Premixed combustion (B-C) ระบบเชื้อเพลิงคู่จะมีช่วงนี้สั้นกว่าดีเซล เนื่องจากปริมาณที่น้ำมันที่ระเหยจนมีอัตราส่วนผสมพอดีมีปริมาณน้อยจึงทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้นไปได้เพียงเล็กน้อย, ช่วง Primary fuel ignition delay (C-D) จะเป็นช่วงที่เกิดในระบบเชื้อเพลิงคู่เท่านั้น ความดันจะลดลงเล็กน้อยในช่วงนี้เนื่องจากก๊าซธรรมชาติต้องการอุณหภูมิในการจุดระเบิดสูง (ประมาณ 500 ^{o}C) ทำให้พลังงาน

ช่วงนี้ถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับก๊าซเพื่อใช้ในการจุดระเบิดก๊าซในช่วงต่อไป, ช่วง Rapid combustion of primary fuel (D-E) จะเป็นช่วงที่ส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศเริ่มเผาไหม้ทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้น แต่ความดันสูงสุดของระบบเชื้อเพลิงคู่จะต่ำกว่าดีเซลเนื่องจากการเผาไหม้ในช่วงนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดในจังหวะขยายจึงทำให้ความดันต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลที่มีช่วง Premixed combustion ในช่วงก่อน TDC จึงทำให้เครื่องยนต์ดีเซลสร้างความดันได้มากกว่าระบบเชื้อเพลิงคู่, ในช่วง Diffusion combustion stage (E-F) จะเป็นช่วงที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือซึ่งจะเป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากความเร็วเปลวไฟของก๊าซธรรมชาติมีค่าต่ำ หลังจากนั้นการเผาไหม้จะสิ้นสุดลงซึ่งอาจจะมีก๊าซและอากาศหลงเหลือเนื่องจากมีอัตราส่วนผสมบางเกินไป

2.3.1.3 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc)

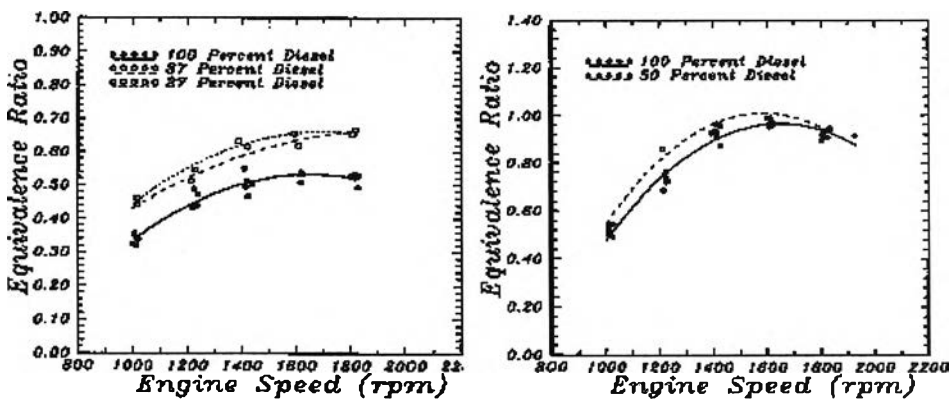
ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของระบบเชื้อเพลิงคู่จะมีค่าสูงกว่าดีเซลที่ภาระของเครื่องยนต์ต่ำ และจะมีค่าใกล้เคียงกับดีเซลเมื่อภาระของเครื่องยนต์สูงขึ้น และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของระบบเชื้อเพลิงคู่จะต่ำกว่าดีเซลที่ภาระของเครื่องยนต์ต่ำ แต่จะใกล้เคียงกับดีเซลเมื่อภาระของเครื่องยนต์สูงขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง bsfc และ η_{th} กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ภาระต่างๆ a) 1/4 load b) half load c) full load [3]

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเชื้อเพลิงคู่ด้อยกว่าดีเซลที่ภาระเครื่องยนต์ต่ำ เกิดขึ้นเนื่องจากขณะที่เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำและมีภาระของเครื่องยนต์ต่ำ ก๊าซจะถูกจ่ายเข้าสู่เครื่องยนต์น้อยทำให้มีอากาศส่วนเกินมาก ซึ่งจะทำให้ส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศบาง เมื่อเปลวไฟจากน้ำมันดีเซลลามมาถึงส่วนที่เป็นก๊าซผสมกับอากาศที่มีส่วนผสมบางจะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟของก๊าซต่ำ และอาจจะเกิดการดับของเปลวไฟในบริเวณที่มีส่วนผสมบางมากๆ อีกสาเหตุหนึ่งก็คืออัตราเร็วในการเผาไหม้ต่ำ เนื่องจากมีเทนซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติจะมีความเร็วของเปลวไฟในการเผาไหม้ต่ำ จากสาเหตุเหล่านี้จึงส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ของระบบเชื้อเพลิงคู่ยาวกว่าดีเซล จึงทำให้ระบบเชื้อเพลิงคู่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับดีเซลที่ภาระเครื่องยนต์ต่ำ ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเชื้อเพลิงคู่ด้อยกว่าดีเซล



รูปที่ 2-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent ratio กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ภาระต่างๆ a) half load b) full load [3]

เมื่อภาระของเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ bsfc และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเชื้อเพลิงคู่จะใกล้เคียงกับดีเซล เนื่องจากเมื่อภาระของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซถูกดูดเข้าไปผสมกับอากาศมากขึ้น ทำให้สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศในห้องเผาไหม้สูงขึ้น (ใกล้เคียง 1) ดังแสดงในรูปที่ 2-6 การเพิ่มขึ้นของอัตราผสมเชื้อเพลิงต่ออากาศจะทำให้ไม่มีอากาศส่วนเกินที่จะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟของก๊าซต่ำ จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ยาวขึ้นทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ bsfc และประสิทธิภาพเชิงความร้อนดีขึ้นจนใกล้เคียงกับการใช้ดีเซลเพียงอย่างเดียว

2.4 สรุปการใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่เทียบกับการใช้เครื่องยนต์ดีเซลแบบ Indirect Injection

2.4.1 ความดันที่เกิดขึ้นในกระบอกสูบของระบบเชื้อเพลิงคู่จะต่ำกว่าดีเซล และจุดที่เกิดความดันสูงสุดของระบบเชื้อเพลิงคู่จะเกิดหลัง TDC ซึ่งจะเกิดช้ากว่าดีเซล

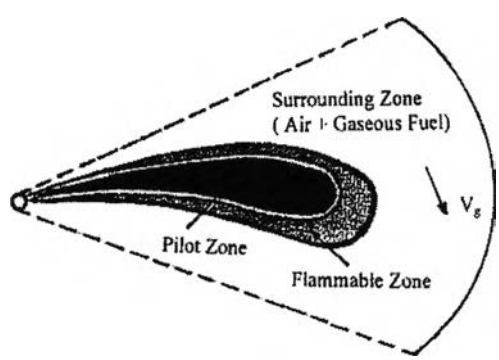
2.4.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของระบบเชื้อเพลิงคู่จะสูงกว่าดีเซลเมื่อภาระของเครื่องยนต์ต่ำ แต่จะใกล้เคียงกับดีเซลเมื่อภาระเครื่องยนต์สูงขึ้น

2.4.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเชื้อเพลิงคู่จะต่ำกว่าดีเซลเมื่อภาระเครื่องยนต์ต่ำ แต่จะใกล้เคียงกับดีเซลเมื่อภาระเครื่องยนต์สูงขึ้น

2.4.4 ปริมาณเขม่าของระบบเชื้อเพลิงคู่จะต่ำกว่าดีเซลที่ทุกความเร็วรอบและภาระเครื่องยนต์

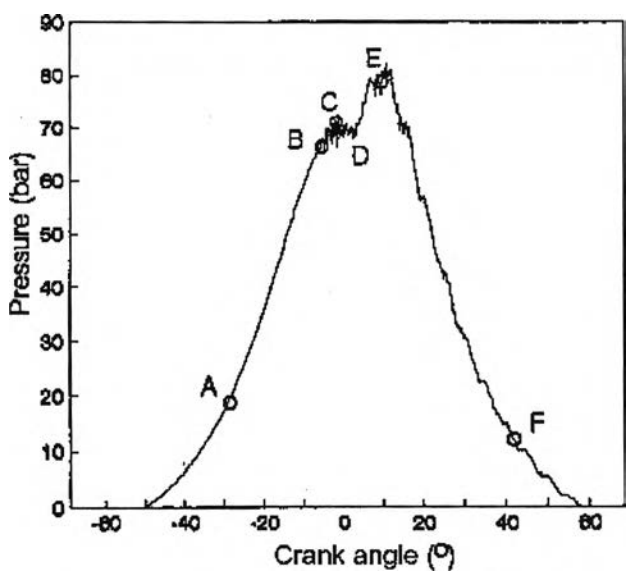
2.5 การเกิดน็อกในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่

ในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่จะมีลักษณะการเผาไหม้ที่รวมลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดและจุดระเบิดด้วยประกายไฟเข้าไว้ด้วยกัน การฉีดน้ำมันดีเซลเข้าไปในห้องเผาไหม้ในจังหวะที่เหมาะสมจนเกิดการระเบิดขึ้นเองซึ่งเป็นลักษณะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหลังจากนั้นก๊าซและอากาศจะถูกเผาไหม้ตามมา โดยมีจุดกำเนิดของการเผาไหม้จากการระเบิดของน้ำมันที่ฉีดเข้าไป ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ซึ่งลักษณะการฉีดน้ำมันเข้าผสมกับก๊าซและอากาศจะแบ่งออกเป็น 3 บริเวณหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-7 ซึ่งแบ่งเป็น Pilot zone เป็นบริเวณที่เป็นสเปรย์ของน้ำมันที่ออกมาจากหัวฉีด เชื้อเพลิงส่วนนี้จะมีส่วนผสมหนาเกินกว่าขีดจำกัดในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง บริเวณที่สอง Flammable zone เป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงทั้ง 3 ผสมกันและอยู่ในช่วงขีดจำกัดของส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงที่สามารถจุดระเบิดเองได้ และบริเวณสุดท้ายคือ Surrounding zone เป็นบริเวณที่มีเพียงส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2-7 แสดงบริเวณการกระจายตัวของน้ำมันที่ถูกฉีดเข้ามาผสมกับก๊าซ

ในกรณีที่ส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศบางคือมีปริมาณก๊าซน้อยเกินไป ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดในกรณีที่เครื่องยนต์มีความเร็วรอบต่ำหรือมีภาระของเครื่องยนต์ต่ำ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็น Flammable zone ดังแสดงในรูปที่ 2-7 ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำมันแตกตัวเป็นละอองฝอยผสมกับก๊าซและอากาศในสัดส่วนที่พอเหมาะกับการเผาไหม้ การเผาไหม้จึงเกิดขึ้นหลายๆจุดในเวลาใกล้เคียงกันแล้วจึงลามต่อไปยัง surrounding zone ที่มีส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศบางจึงทำให้เปลวไฟไม่สามารถลามต่อไปถึงก๊าซและอากาศที่มีส่วนผสมบางมากได้จึงทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มีปริมาณก๊าซเหลือจากการเผาไหม้มากซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ต่ำกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ต่ำและมีมลพิษจากการเผาไหม้สูง เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซมากขึ้นจนถึงจุดที่เหมาะสมจะทำให้ความสามารถในการลามของเปลวไฟเป็นไปได้อย่างดีจะทำให้เปลวไฟจาก Flammable zone ลามไปยังส่วนของก๊าซได้ดีขึ้นทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างรวดเร็วและทั่วถึงส่วนผสมทั้งหมดส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงขึ้นกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์สูงขึ้นและมีมลพิษจากการเผาไหม้อยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซเข้าไปอีกจะทำให้เกิดการน็อกของเครื่องยนต์ซึ่งการน็อกของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงคู่จะแบ่งการน็อกได้ออกเป็น 2 ส่วนก็คือ การน็อกซึ่งเกิดจากน้ำมันดีเซลและการน็อกที่เกิดจากส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศ



รูปที่ 2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับมุมเพลาข้อเหวี่ยง
ของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่เมื่อเกิดการน็อก [4]

กระบวนการเผาไหม้ของระบบเชื้อเพลิงคู่จะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 5 ช่วงหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-8 ดังนี้ ช่วง A-B Pilot ignition delay, ช่วง B-C Pilot premixed combustion, ช่วง C-D Primary fuel ignition delay, ช่วง D-E Rapid combustion of primary fuel และช่วง E-F

Diffusion combustion stage จากรูปที่ 2-8 จะพบว่าในช่วง B-D มีการเปลี่ยนแปลงของความดันในห้องเผาไหม้อย่างรวดเร็วซึ่งแสดงถึงอาการน็อกของเครื่องยนต์ การน็อกในช่วงนี้จะเป็นการน็อกที่เกิดขึ้นจากส่วนของน้ำมันดีเซลหรือเรียกว่า Diesel knock ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณก๊าซภายในห้องเผาไหม้มากส่งผลให้ Ignition delay ในการเผาไหม้ยาว ตามปกติน้ำมันจะถูกฉีดตลอดเวลาในช่วง Ignition delay และช่วงการเผาไหม้ การที่ Ignition delay ยาวจะทำให้ปริมาณน้ำมันที่ผสมกับก๊าซและอากาศในสัดส่วนพอดีมีมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการจุดระเบิดที่รุนแรงในช่วง B-C ทำให้เกิดการน็อกของเครื่องยนต์

ส่วนการน็อกที่เกิดจากส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศจะเป็นการน็อกที่มีสาเหตุจากการชิงจุดระเบิดก่อนของก๊าซส่วนสุดท้าย (End-gas auto ignition) ซึ่งสาเหตุการน็อกซึ่งเหมือนกับการน็อกในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ เรียกการน็อกแบบนี้ว่า Spark knock การน็อกแบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากในช่วง C-D ซึ่งเป็นช่วงที่ก๊าซดูดพลังงานความร้อนเพื่อไปเพิ่มอุณหภูมิให้ตัวเองมีระยะเวลายาว ซึ่งช่วง C-D นี้จะเกิดหลังจากการจุดระเบิดของน้ำมันทำให้ก๊าซส่วนสุดท้ายที่อยู่ห่างจาก Ignition source ที่เกิดจากน้ำมันมีเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้ตัวเองจนทำให้เกิดการจุดระเบิดขึ้นก่อน การน็อกในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อภาระของเครื่องยนต์ต่ำเนื่องจากช่วง C-D จะยาว แต่จะลดลงเมื่อภาระของเครื่องยนต์สูงขึ้นเนื่องจากช่วง C-D จะสั้นลง

การน็อกของเครื่องยนต์ในระบบเชื้อเพลิงคู่นอกจากจะเกิดจากการที่มีก๊าซมากเกินไปภายในห้องเผาไหม้และมีช่วงเวลาการเพิ่มอุณหภูมิให้ก๊าซยาวแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ช่วยเสริมให้เกิดการน็อกอีก เช่น ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, ภาระของเครื่องยนต์และอุณหภูมิส่วนผสมของก๊าซกับอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ แต่ในการทำงานจริงเราจะไม่สามารถควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้ ดังนั้นเราจึงใช้การปรับสัดส่วนปริมาณก๊าซต่อน้ำมัน การที่ลดสัดส่วนปริมาณก๊าซต่อน้ำมันลงจะทำให้เครื่องยนต์ไม่เกิดอาการน็อกได้

2.6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องยนต์

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์ได้แก่ กำลังเบรก, แรงบิดเบรก, อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก, อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะ, ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะ, ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรและอัตราส่วนสมมูลรวม

กำลังเบรกของเครื่องยนต์ (Brake Power, P_b (kW))

$$P_b = T_b\omega = \frac{2\pi NT_b}{6000} \qquad (2\text{-}1)$$

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC (g/kW.hr))

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \tag{2-2}$$

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะ (Specific Total Energy Consumption, STEC (MJ/kW.hr))

$$STEC = \frac{\left(\dot{m}_{fd} Q_{HV,d} + \dot{m}_{fb} Q_{HV,b} \right)}{P_b} \tag{2-3}$$

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะ (Specific Total Energy Conversion Efficiency, STECE, (%))

$$STECE = \frac{P_b}{\left(\dot{m}_{fd} Q_{HV,d} + \dot{m}_{fb} Q_{HV,b} \right)} \times 100 \tag{2-4}$$

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric Efficiency, η_v)

$$\eta_v = \frac{120 \dot{m}_a x10^3}{\rho_{a,i} V_d N} \tag{2-5}$$

อัตราส่วนสมมูลรวม (Total Equivalent Ratio, ϕ_t)

$$\phi_t = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_S} = \frac{\left(\dot{m}_{fb} (F/A)_{S,b} + \dot{m}_{fd} (F/A)_{S,d} \right)}{\dot{m}_a} \tag{2-7}$$

โดยที่ ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

N = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rev/min)

V_d = Displacement Volume (dm^3)

Q_{HV} = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ (kg/s)

$\dot{m}_f$ = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/s)

$\dot{m}_{fd}$ = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล (kg/s)

$\dot{m}_{fb}$ = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ (kg/s)

$\rho_{a,i}$ = ความหนาแน่นของอากาศที่ไหลเข้าเครื่องยนต์ (kg/m^3)

สำหรับในระบบเชื้อเพลิงคู่ตัวห้อย d หมายถึง ค่าจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซล และ ตัวห้อย b หมายถึง ค่าจากการใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ

อัตราการส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซล (Diesel Substitution,%)

$$\text{Diesel Substitution \%} = \frac{V_{DIESEL,diesel} - V_{DDF,diesel}}{V_{DIESEL,diesel}} \times 100 \qquad (2\text{-}8)$$

$V_{DDF,diesel}$ = ปริมาณน้ำมันดีเซลเมื่อใช้น้ำดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ (L/hr)

$V_{DIESEL,diesel}$ = ปริมาณน้ำมันดีเซลเมื่อทดสอบโดยใช้น้ำมันดีเซล (L/hr)

เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ ($\%Baht\downarrow$)

$$\%Baht\downarrow = \left(\frac{\left(Sub_{diesel} \times X_{diesel}\right) - \left(V_{DDF,biogas} \times X_{biogas}\right)}{\left(V_{d,diesel} \times X_{diesel}\right)} \right) \times 100 \qquad (2\text{-}9)$$

Sub_{diesel} = ปริมาณน้ำมันดีเซลที่ลดลงเมื่อทดสอบโดยใช้น้ำดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ เปรียบเทียบกับเมื่อใช้น้ำมันดีเซล (L)

$V_{DDF,biogas}$ = ปริมาณก๊าซชีวภาพเมื่อใช้น้ำดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ (L/hr)

X_{diesel} = ราคาน้ำมันดีเซล (Baht/L)

X_{biogas} = ราคาก๊าซชีวภาพ (ต้นทุนการผลิต) (Baht/L)