

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันดีเซล [6]

น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel) คือ เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบเป็นน้ำมันใส (Distillate Fuel) มีอะตอมคาร์บอน 13-18 อะตอม มีช่วงจุดเดือดระหว่าง 250-300 °C

2.1.1 ชนิดน้ำมันดีเซล

2.1.1.1 ดีเซลหมุนเร็ว (High Speed Diesel Oil, HSD) หรือน้ำมันโซล่าเป็นน้ำมันที่ใช้กับยานยนต์ (Automotive Diesel Oil) เช่น รถบรรทุก แทรกเตอร์ เรือประมง เรือโดยสาร (Marine Gas Oil) และเครื่องจักรกลมีความเร็วรอบเกิน 1,000 rpm เครื่องยนต์ประเภทนี้ใช้น้ำมันที่มีค่าอัตราซีเทนสูงระเหยเป็นไอได้เร็ว

2.1.1.2 ดีเซลหมุนช้า (Low Speed Diesel Oil, LSD) ใช้ในเครื่องยนต์ความเร็วรอบต่ำ ขับส่งกำลังขนาดใหญ่ ติดตั้งตามโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Diesel Oil) รอบการทำงานต่ำ 500-1,000 rpm เครื่องยนต์ไม่ต้องการน้ำมันที่มีค่าอัตราซีเทนสูง เรียกเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่า น้ำมันซีโล่ เป็นน้ำมันที่มีส่วนผสมของน้ำมันดีเซลหมุนเร็วกับน้ำมันเตา

2.1.2 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซล [7]

2.1.2.1 อัตราซีเทน (Cetane Number) เป็นตัวเลขที่ชี้คุณภาพในการติดไฟ เชื้อเพลิงที่มีอัตราซีเทนสูง เป็นเชื้อเพลิงที่จุดตัวเองได้ง่าย โดยไม่เกิดการน็อกเนื่องจากจุดติดตัวเองได้ยาก

2.1.2.2 ความสะอาด (Cleanliness) เป็นคุณสมบัติของน้ำมันที่สะอาดทั้งก่อนและหลังการเผาไหม้ เช่น ต้องไม่มีสิ่งสกปรก ตะกอน กากถ่าน หรือเขม่าที่น้อยที่สุด

2.1.2.3 การติดไฟ (Ignition Quality) ความสามารถติดเครื่องยนต์ได้เร็วที่อุณหภูมิที่มีความสัมพันธ์กับอัตราซีเทน เป็นคุณสมบัติต้านการน็อกของเครื่องยนต์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว

2.1.2.4 การระเหยตัว (Volatility) การระเหยตัวของน้ำมัน ควรมีความเหมาะสมต่อจุดวาบไฟ จุดเดือด และจุดติดไฟ ของน้ำมันดีเซลด้วย

2.1.2.5 การกระจายเป็นฝอยละเอียด (Fluidity and Atomization) ขึ้นกับความหนืดน้ำมันที่ดีต้องมีความหนืดเหมาะสม เครื่องยนต์ดีเซลใช้น้ำมันเป็นสารหล่อลื่นบีบหัวฉีดเชื้อเพลิง น้ำมันถ้ามีความหนืดมากเกินไป การกระจายตัว และเป็นฝอยละเอียด จะไม่ดีเท่าที่ควร

2.1.2.6 มีความปลอดภัย (Safety) สำหรับความปลอดภัยของน้ำมันดีเซล ควรค่าการระเหยตัวต่ำ จึงมีความปลอดภัยสูง

2.2 ปาล์มไบโอดีเซล [8]

ภาพที่ 2.1 แสดงต้นปาล์มน้ำมัน และผลปาล์มน้ำมันใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ปาล์มไบโอดีเซล (Palm biodiesel) คือ ไบโอดีเซลที่ผลิตมาจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์ม คือ น้ำมันพืชที่ผลิตได้จากผลปาล์มน้ำมัน และไบโอดีเซล คือ เชื้อเพลิงผลิตจากน้ำมันสัตว์ หรือน้ำมันพืช ที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี

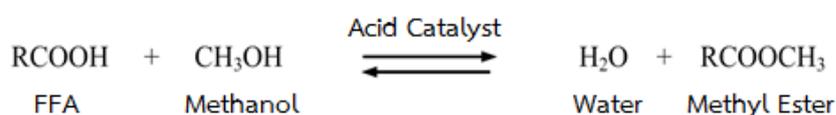


ภาพที่ 2.1 ต้นปาล์มน้ำมันและผลปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

2.2.1 การผลิตไบโอดีเซลหรือเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเคมี [9]

2.2.1.1 การทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification)

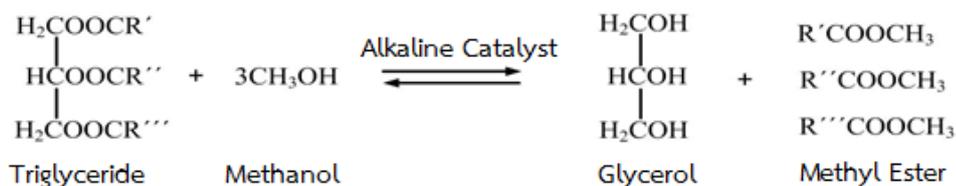
ภาพที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กรดช่วยทำปฏิกิริยาให้กลายเป็นเอสเทอร์ได้เร็วขึ้น ผลผลิตที่ได้คือเอสเทอร์กับน้ำ



ภาพที่ 2.2 การผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

2.2.1.2 ปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification)

ภาพที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ได้ไบโอดีเซล เรียกตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยา ใช้เอทานอลเรียกว่าเอทิลเอสเทอร์ (Ethyl Ester) ใช้เมทานอลเรียกว่าเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) เมทานอลนิยมใช้มาก มีโมเลกุลขนาดเล็ก ทำปฏิกิริยาได้ง่าย ราคาถูก ใช้กรด หรือด่าง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต่างนิยมใช้มากกว่ากรด ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์กว่า ให้ผลผลิตที่อ่อนนุ่มต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ได้ผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอริน และเอสเทอร์ การใช้ด่างต้องไม่มีน้ำปนอยู่ในน้ำมัน และแอลกอฮอล์ที่ใช้ เพราะน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาซาปอนนิฟิเคชัน (Saponification) เกิดเอสเทอร์น้อยลง เกิดเป็นสบู่ ทำให้การแยกกลีเซอรินออกจากเอสเทอร์ทำได้ยาก



ภาพที่ 2.3 การผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน

2.2.2 มาตรฐานไบโอดีเซล [8]

เพื่อให้มาตรฐานไบโอดีเซลเป็นที่ยอมรับ กรมธุรกิจพลังงานได้ออกประกาศมาตรฐานของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ของกรดไขมันปี พ.ศ.2548 มีวัตถุประสงค์ใช้ผสมกับน้ำมันดีเซล ข้อกำหนดคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ของกรดไขมันมีดังนี้ คือ

2.2.5.1 เมทิลเอสเตอ์

เป็นสารที่แสดงว่าการผลิตไบโอดีเซลเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ หากมีน้อยกว่าที่กำหนด แสดงว่าไบโอดีเซลมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์สูงกว่าที่กำหนด ทำให้ความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลสูงเกินกำหนด เกิดการอุดตันในหัวฉีดกระบอกสูบเครื่องยนต์

2.2.5.2 ความหนาแน่น (15 °C)

เป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบระบบหัวฉีด และปั๊มจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง บ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง ความหนาแน่นมากให้พลังงานมาก ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เกิดจากปริมาณของเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซล หากตกค้างมากทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความหนาแน่นต่ำ

2.2.5.3 ความหนืด (40 °C)

เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำมัน การฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยของหัวฉีด การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กในห้องเผาไหม้ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับชนิดน้ำมันที่เป็นวัตถุดิบ ความหนืดแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.2.5.4 จุดวาบไฟ

คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่เปลวไฟผ่านเหนือไอน้ำมันทำให้น้ำมันติดไฟ ขึ้นกับปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซล ทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน จุดวาบไฟต่ำมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และเก็บรักษา

2.2.5.5 กำมะถันในน้ำมัน

เมื่อเผาไหม้ในเครื่องยนต์เปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสีย เกิดฝุ่นละออง

2.2.5.6 กากถ่าน

ควรน้อยกว่าร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น ปริมาณกากถ่านสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซล กากถ่านมีผลเสียต่อการอุดตันในหัวฉีด หรือลูกสูบ กำลังเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกเปลี่ยนน้ำมันเครื่องบ่อย

2.2.5.7 อัตราซีเทน

บอกถึงความสามารถในการจุดระเบิด และการสตาร์ทติดเครื่องยนต์ ว่ามีความยากง่ายเพียงใด หากจุดระเบิดและสตาร์ทติดยากมีผลทำให้เครื่องยนต์น็อกได้

2.2.5.8 แก๊ซัลเฟต

เกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์ เกิดรอยสึกหรอที่หัวฉีด ปัม ลูกสูบ และแหวน

2.2.5.9 ปริมาณน้ำในน้ำมัน

ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เป็นสาเหตุทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติก ระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ มีผลต่อการกัดกร่อนเครื่องยนต์ เป็นตัวเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน เป็นสาเหตุทำให้หัวฉีดอุดตัน

2.2.5.10 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

สารปนเปื้อนทำให้น้ำมันเสื่อมสภาพ เกิดการตกตะกอน เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ มีสิ่งสกปรกที่หัวฉีด

2.2.5.11 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์จากปริมาณกรด เช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ที่อยู่ในน้ำมัน การกัดกร่อนมีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

2.2.5.12 เสถียรภาพต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ที่ 110 °C)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากเกิดสารประกอบเพอรอกไซด์ (Peroxide linkage) ระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในไบโอดีเซล เกิดปฏิกิริยาเมื่อน้ำมันสัมผัสออกซิเจนในอากาศ มีความร้อน แสงแดด โลหะทองแดง และตะกั่ว เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ เกิดของแข็งไม่ละลายในไบโอดีเซล การเกิดปฏิกิริยายังขึ้นกับกระบวนการผลิต เช่น การให้ความร้อนสูงแก่ไบโอดีเซลเป็นเวลานาน ส่งผลต่อเสถียรภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.2.5.13 ค่าความเป็นกรด

ปริมาณกรดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีผลต่อการกัดกร่อนเครื่องยนต์ อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองลดลง ความเป็นกรดแสดงการเสื่อมของน้ำมันจากปฏิกิริยาไฮโดรไลติกของน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมัน ส่งผลต่อสถานะในการจัดเก็บ

2.2.5.14 ค่าไอโอดีน

แสดงพันธะคู่ในน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างสูง ทำให้ไม่เกิดออกซิเดชัน ค่าไอโอดีนสัมพันธ์กับจุดขุ่น แสดงถึงอุณหภูมิเริ่มเกิดไขจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง มีผลต่อการใช้งานในสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55

2.2.5.15 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

แสดงถึงพันธะคู่ ความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล มีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

2.2.5.16 กลีเซอรินอิสระ

คือ กลีเซอรินที่เหลืออยู่ เกิดจากการแยกกลีเซอริน ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาในการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล มีการสะสมของกลีเซอรินบริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน มีผลต่อการลำเลียงน้ำมัน และการอุดตันของหัวฉีด

2.2.5.17 เมทานอล

สารตั้งต้นเกิดจากการผลิตไบโอดีเซล ต้องกำจัดให้หมดก่อนนำไปใช้ เมทานอลมีจุดวาบไฟต่ำทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลง มีผลต่อความปลอดภัย การเก็บรักษา การขนส่ง และการนำไปใช้ หากมีความเข้มข้นของเมทานอลเกินกว่าร้อยละ 5 มีผลกระทบต่ออัตราซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

2.2.5.18 โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

ที่เหลือจากปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีดกระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

2.2.5.19 กลีเซอรินทั้งหมด

คือ ปริมาณกลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินในโมเลกุล อันได้แก่ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่ปะปนอยู่ในไบโอดีเซล เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีด และไส้กรอง เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเกิดการตกตะกอน

2.2.5.20 โลหะหมู่ 1 (Na และ K) และโลหะหมู่ 2 (Ca และ Mg)

บอกถึงตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนัก จากน้ำล้างไบโอดีเซลที่เหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล Ca เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในกระบวนการพอลิเมอไรด์ของเอสเทอร์ ทำให้เกิดเง้าตกค้างในไส้กรองของเครื่องยนต์

2.2.5.21 ฟอสฟอรัส

ปนเปื้อนในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่กำจัดออกจะปะปนอยู่ภายในไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ทำความเสียหายกับ (Catalytic converter) ที่ใช้ในการควบคุมมลพิษ

2.3 เอทานอล (Ethanol) [9]

เอทานอล หรือเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นเชื้อเพลิงได้จากการย่อยแป้ง และน้ำตาลด้วยเอนไซม์มีสูตรเคมี คือ C_2H_5OH เอทานอลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องนำมากลั่นซ้ำจนบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.8 ถ้ามีน้ำปนอยู่มากทำให้เครื่องยนต์น็อก และชิ้นส่วนของเครื่องเกิดสนิม ภาพที่ 2.4 แสดงวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอล และขั้นตอนการผลิตเอทานอล เปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบที่ใช้โดยสังเขป

2.3.1 ผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้ในการผลิตเอทานอล

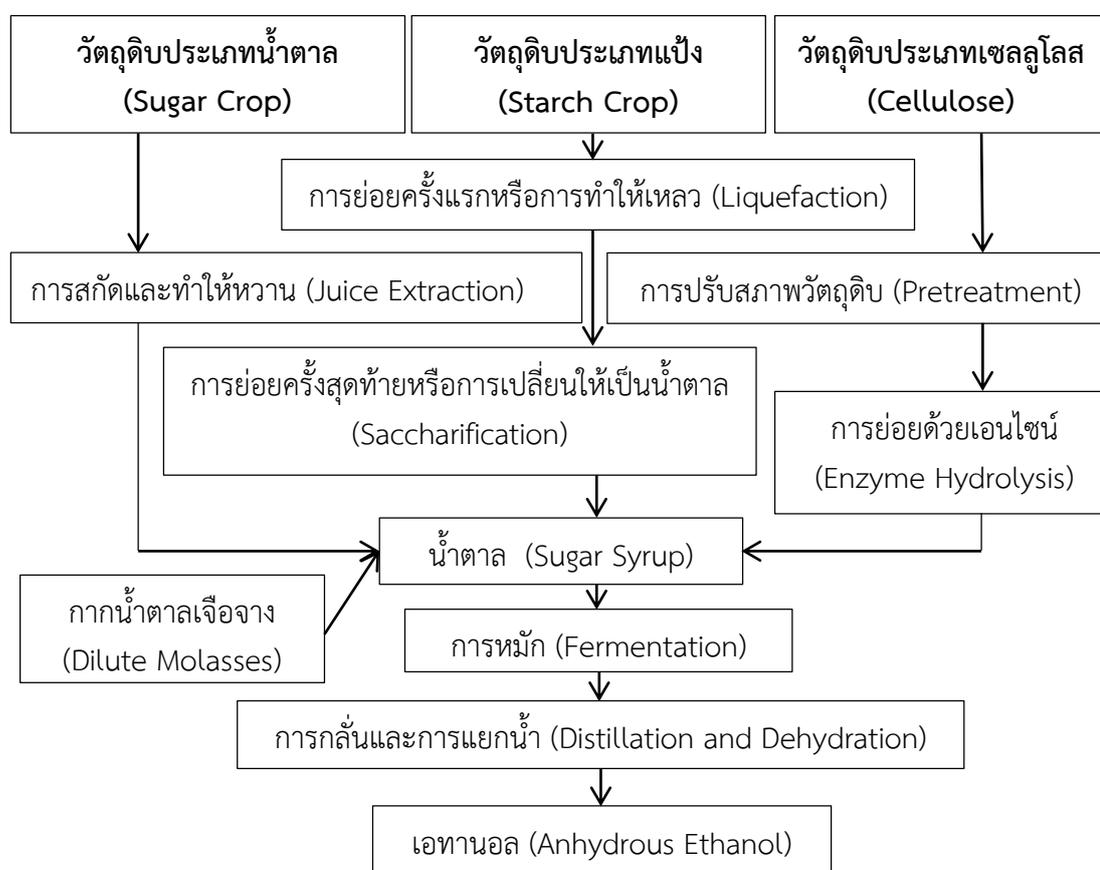
พืชพลังงานที่ใช้ผลิตเอทานอลได้แก่ อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวฟ่างหวาน ข้าวโพด พิจารณาจากความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นเกณฑ์ เอทานอลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลัก 3 ประเภท คือ

2.3.1.1 ประเภทแป้ง ได้แก่แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์

ข้าวฟ่าง และแป้งจากพืชหัว เช่น มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง มันสำปะหลังเส้น (Cassava chips) มันสำปะหลังอัดเม็ด (Cassava pellets) และแป้งมันสำปะหลัง (Cassava flour)

2.3.1.2 ประเภทน้ำตาล ได้แก่ อ้อย บีทรูท ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล (Molasses) จึงเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล ในการหีบอ้อย 1 ตัน ได้กากน้ำตาล 45 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 4.5 ของปริมาณอ้อยที่หีบ กากน้ำตาลมีลักษณะเหนียวข้นสีน้ำตาล

2.3.1.3 ประเภทเส้นใย เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย รำข้าว เศษไม้ ชังข้าวโพด ชีกล้วย วัชพืช รวมทั้งของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ



ภาพที่ 2.4 แผนภาพกระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทกากน้ำตาล เซลลูโลส แป้ง

2.3.4 มาตรฐานของเอทานอล [8]

กรมธุรกิจพลังงานประกาศมาตรฐานเอทานอลแปลงสภาพ พ.ศ.2548 มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 23 สิงหาคม 2548 เอทานอลที่ผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อผลิตแก๊สโซฮอล์ต้องผ่านการแปลงสภาพโดยเติมสารไฮโดรคาร์บอนในเอทานอลประมาณร้อยละ 0.5 ป้องกันนำไปบริโภค มาตรฐานเอทานอลแปลงสภาพกำหนดขึ้นโดยอ้างอิงจากมาตรฐานของการผลิตเอทานอลบราซิล อเมริกา ยุโรป ดังนี้

2.3.4.1 ปริมาณเอทานอล (Ethanol Content)

มีผลต่อการหล่อลื่นของน้ำมัน มีมากเกินไปทำให้ความสามารถหล่อลื่นลดลง

2.3.4.2 ส่วนของวัสดุที่ไม่ระเหย (Solvent Washed Gum)

หมายถึง วัสดุที่ไม่ระเหย และสะสมบริเวณหัวฉีดน้ำมัน ท่อส่งน้ำมัน และวาล์ว ทำให้การทำงานผิดปกติ

2.3.4.3 ปริมาณเมทานอล (Methanol Content)

เมทานอลปนเปื้อนในขั้นตอนการผลิตเอทานอล หากมีมากความหนืดของเอทานอลรวมตัวกับน้ำมันที่คาลดลง แรงดันไอเชื้อเพลิงที่ผสมเอทานอลเพิ่มขึ้น หากเมทานอลมีความบริสุทธิ์ต่ำ ทั้งน้ำมันสน น้ำมันดิน ยังคงถูกเก็บรักษาไว้ที่ถังก่อนโลหะให้ฟุ้ง หรือทำให้ยางเสื่อมสภาพ ในข้อกำหนด ASTM D 4806 และ ASTM D 5798 ให้มีเมทานอลได้ไม่เกินร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

2.3.4.4 ปริมาณน้ำที่ผสมในเอทานอล

มีผลต่อคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้เอทานอลผสม น้ำมันที่มีเอทานอลปะปนอยู่ในปริมาณน้อยจะรวมตัวกับน้ำได้ง่าย โดยเฉพาะน้ำในชั้นบรรยากาศ ความสามารถในการรวมตัวของน้ำกับเอทานอลขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- 1) ในน้ำมันที่มีสารอะโรมาติกมาก จะสามารถทนต่อการรวมตัวกับน้ำได้ดีกว่า
- 2) อุณหภูมิในการผสมระหว่างน้ำมันกับเอทานอล หากผสมด้วยอุณหภูมิสูงจะทนต่อการรวมกันของน้ำได้ดี หากผสมที่อุณหภูมิต่ำเกิดการแยกชั้นของน้ำมันกับเอทานอล โดยชั้นบนจะเป็นน้ำมัน ชั้นล่างเป็นเอทานอล น้ำ และสารอะโรมาติก การแยกชั้นจึงมีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์

2.3.4.5 สารคลอไรด์ (Chloride)

เกิดจากกระบวนการผลิตเอทานอล บางกรณีเกิดจากกรดไฮโดรคลอริกซึ่งถูกนำมาใช้ในการผลิตเอทานอล Chloride Ion กัดกร่อนโลหะ เช่น อุปกรณ์หัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงส่วนที่เป็นโลหะของระบบท่อไอเสีย

2.3.4.6 สารทองแดง

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดออกซิเดชันไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำเกิดยางเหนียวเพิ่มขึ้น โดยผลทดสอบของ ASTM แสดงว่าเมื่อมีทองแดงมากกว่า 0.012 ppm ในน้ำมันเบนซิน ทำให้เกิดยางเหนียว ASTM เสนอว่าควรควบคุมให้มีไม่เกิน 0.1 mg/kg ของเอทานอล

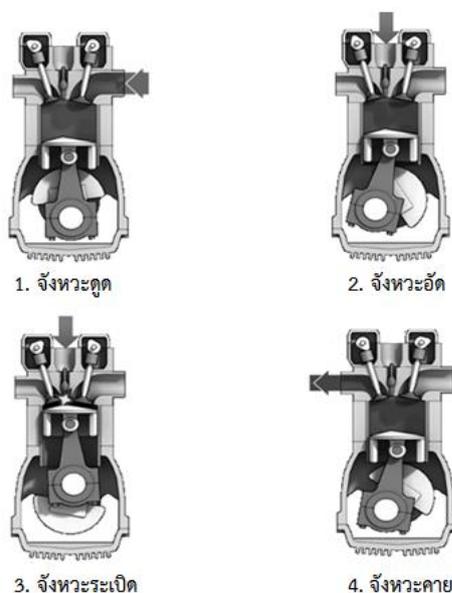
2.3.4.7 สารที่มีฤทธิ์เป็นกรดและสภาพตัวนำไฟฟ้า

สารมีฤทธิ์เป็นกรดจะทำให้เกิดการกัดกร่อน ต้องควบคุมให้มีน้อยที่สุด สภาพตัวนำไฟฟ้าหากเอทานอลมีสภาพนำไฟฟ้าสูงเกินไป เอทานอลจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตในถังเชื้อเพลิง

2.4 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด [6]

ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด 4 จังหวะ นำอากาศเข้าโดยธรรมชาติ อากาศถูกนำเข้าไปในกระบอกสูบในช่วงจังหวะดูดและถูกอัดจนมีความดัน 4 MPa อุณหภูมิ 800 K ในการอัดอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซลสูงอยู่ในช่วง 12-24 เมื่อลูกสูบอยู่ที่ 20 °CA ฉีดเชื้อเพลิงจุดระเบิดเข้าไปในห้องเผาไหม้ เกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยผสมกับอากาศที่อุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดจุดระเบิดของเชื้อเพลิง หลังช่วงล่าช้า (Delay Period) ในระยะเวลาสั้นๆ เกิดการจุดระเบิดด้วยตัวเองของสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ เมื่อเริ่มต้นการเผาไหม้ความดันภายในกระบอกสูบจะสูงกว่าความดันที่ไม่มีการเผาไหม้ เปลวไฟกระจายตัวอย่างรวดเร็วผ่านเข้าไปในส่วนของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดผสมกับ

อากาศที่มากพอสำหรับการเผาไหม้ เกิดการผสมกันของเชื้อเพลิงอากาศ และแก๊สที่เผาไหม้ไม่หมด รวมถึงการเผาไหม้เพิ่มเติมเกิดขึ้นต่อไปในจังหวะขยายตัว จนเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเผาไหม้จนหมดก่อนที่ลูกสูบจะถึง ตำแหน่ง BDC วาล์วไอเสียเปิด ไอเสียไหลออกเกิดการคาย



ภาพที่ 2.5 การทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ จุติระเบิดด้วยการอัด [6]

2.4.1 กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (CI)

สามารถสรุปลำดับกระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางเคมีได้ดังนี้

2.4.1.1 เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ในรูปลำของเหลวด้วยความเร็วสูง

2.4.1.2 ลำของเหลวจะวิ่งปะทะกับอากาศแตกตัวกลายเป็นหยดเล็กๆ

2.4.1.3 หยดของเหลวเคลื่อนที่ช้าลง และระเหยกลายเป็นไอน้ำมันผสมกับอากาศ

2.4.1.4 เกิดช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดในขณะที่ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเริ่มขึ้น

2.4.1.5 เกิดการเผาไหม้ของสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ

ขั้นตอนที่ 2.4.1.1 ถึง 2.4.1.3 เรียกว่า กระบวนการทางกายภาพ และขั้นตอนที่ 2.4.1.4

ถึง 2.4.1.5 เรียกว่ากระบวนการทางเคมี

2.4.2 การทำงานของเครื่องยนต์ (CI)

ภาพที่ 2.5 แสดงจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ CI มีจังหวะการทำงานดังต่อไปนี้

2.4.2.1 จังหวะดูด วาล์วไอดีเปิดวาล์วไอเสียปิด และอากาศถูกดูดเข้าไป

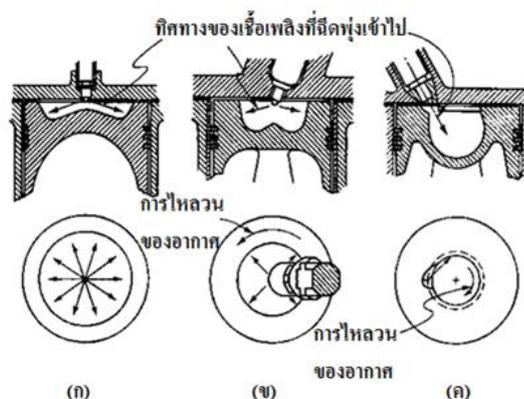
2.4.2.2 จังหวะอัด อากาศเข้าไปในจังหวะดูดถูกอัดจนเหลือปริมาตรเท่าปริมาตรหัวสูบ

ด้านบน วาล์วไอดี และวาล์วไอเสียปิด

2.4.2.3 จังหวะระเบิด หัวฉีดเริ่มต้นทำงานก่อนสิ้นสุดจังหวะอัด โดยมีการฉีดน้ำมันในสภาวะความดันคงที่ ขณะที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ลง น้ำมันกลายเป็นไอที่ความดันคงที่ หัวฉีดหยุดทำงานเมื่อสิ้นสุดช่วง Cut-Off ลูกสูบเคลื่อนที่ลง ทั้งวาล์วไอดี และวาล์วไอเสียปิด

2.4.2.4 จังหวะคาย ลูกสูบเคลื่อนที่จาก BDC-TDC ขับไล่เชื้อเพลิงในไอเสียซึ่งเผาไหม้ไม่หมดออกไปจากห้องเผาไหม้ วาล์วไอดีปิด และวาล์วไอเสียเปิด ข้อดีของเครื่องยนต์ CI คือ มีอัตราส่วนการอัดที่สูง และประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ SI มีอัตราส่วนการอัดที่สูงกว่าจึงต้องออกแบบให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า

2.4.3 ระบบฉีดเชื้อเพลิง [10]



ภาพที่ 2.6 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง [10]

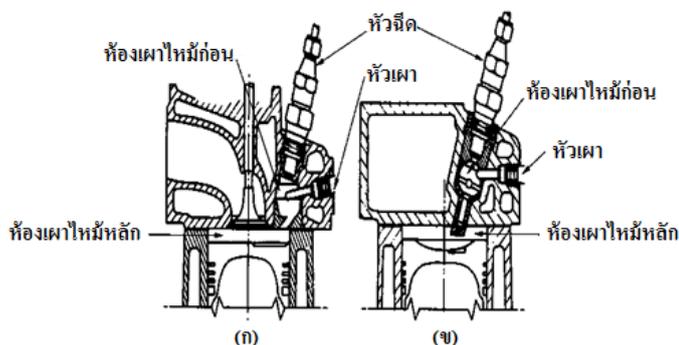
2.4.3.1 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct Injection, DI)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์ CI ชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบ่งตามรูปร่างของห้องเผาไหม้ จำนวนรูหัวฉีด และตำแหน่งหัวฉีด แสดงดังภาพที่ 2.6

1) ห้องเผาไหม้แบบนิ่ง แสดงดังภาพที่ 2.6 (ก) หัวฉีดหลายรูมีใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ อากาศในกระบอกสูบไม่เคลื่อนที่ เนื่องจากโมเมนตัมและพลังงานเชื้อเพลิงที่ฉีดพุ่งเข้าไปในห้องเผาไหม้เพียงพอที่จะกระจายจึงผสมกับอากาศได้ดี รูปร่างห้องเผาไหม้เป็นหลุมตื้นบนผิวหน้าลูกสูบ และใช้หัวฉีดแบบหลายรูไว้ตรงกลาง เมื่อขนาดของเครื่องยนต์เล็กลงจำเป็นต้องเพิ่มการไหลวนเพื่อให้เกิดการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเร็วขึ้น การไหลวนถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการออกแบบช่องไอดีให้เหมาะสม เมื่อลูกสูบเข้าใกล้ TDC มีการเพิ่มการไหลวนขึ้นอีก โดยบังคับให้อากาศไหลเข้าสู่แกนกลางกระบอกสูบ

2) ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ดังภาพที่ 2.6 (ข) ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ใช้กันทั่วไปเป็นแบบมีการไหลวน มีห้องเผาไหม้แบบหลุมในลูกสูบ ใช้หัวฉีดแบบหลายรูติดตั้งไว้ตรงกลาง จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะให้ปริมาณเชื้อเพลิงเคลื่อนที่ไปกระทบผนังของหลุมในลูกสูบน้อยที่สุด

3) ระบบ M ภาพที่ 2.6 (ค) ห้องเผาไหม้แบบลูกสูบหลุม ใช้หัวฉีดรูเดียว เพื่อให้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่กระทบ และติดบนผนังลูกสูบ ระบบแบบ 2.6 (ข) และ 2.6 (ค) ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดกลาง OD 100-150 mm และในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก OD 80-100 mm



ภาพที่ 2.7 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

(ก) ห้องเผาไหม้ก่อนไหลวน (ข) ห้องเผาไหม้ก่อนปั่นป่วน [10]

2.4.3.2 ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (Indirect Injection, IDI)

ดังภาพที่ 2.7 ใช้เมื่อระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงให้อัตราส่วนผสมไม่พอ เช่น ในเครื่องยนต์อัตราเร็วสูงขนาดเล็ก ระบบฉีดโดยอ้อมแบ่งเป็นห้องเผาไหม้ก่อน และห้องเผาไหม้หลัก

2.5 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเชื้อเพลิงร่วม (Dual Fuel Engine) [3, 11]

เป็นเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงร่วม 2 ชนิด ใช้หลักการของเครื่องยนต์ SI ฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าเข้าท่อไอดีผสมกับอากาศในจังหวะดูด และหลักการของเครื่องยนต์ CI ฉีดเชื้อเพลิงมีค่าซีเทนสูงในช่วงปลายสุดของจังหวะอัดเป็นเชื้อเพลิงจุดระเบิด เพื่อให้เครื่องยนต์ดีเซลเปลี่ยนมาใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วม และสามารถทำงานในวัฏจักรดีเซลได้ตามปกติ ติดตั้งระบบฉีดเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงฉีดล่วงหน้า ผ่านท่อไอดีร่วมกับปาล์มไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงจุดระเบิด โดยอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพิ่มเติมประกอบด้วยเซ็นเซอร์จับตำแหน่งวาล์วไอดี และวาล์วไอเสีย แผงวงจรแปลงสัญญาณบอกตำแหน่งวาล์วจากสวิทช์แม่เหล็ก ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลสัญญาณระบุตำแหน่งเพลาค้อเหวี่ยง โปรแกรมคำสั่งฉีดเอทานอลตามอัตราผสมล่วงหน้า หัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์ บีบสูบลูเอทานอล และถังพักเอทานอล

2.5.1 อุปกรณ์ผสมเอทานอลกับอากาศ

อุปกรณ์ผสมเอทานอลกับอากาศมีหลายประเภท เช่น คาร์บูเรเตอร์ใช้งานในเครื่องยนต์ที่ทำงานในสภาวะคงที่ ความเร็วรอบต่ำ การระเหยด้วยความร้อนใช้ในเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้ใช้หัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความแม่นยำในการฉีดสูงเพื่อฉีดเอทานอล ปรับ BMEP 6 ระดับ 0, 143.2, 286.5, 429.7, 572.9 และ 716.2 kPa ที่ 3 ความเร็วรอบ 1,200 1,500 และ 1,800 rpm

2.5.2 พารามิเตอร์ และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบ และวิเคราะห์ผลการทำงานระบบเชื้อเพลิงร่วม ได้แก่ ค่าความร้อนต่ำของ น้ำมันดีเซล เอทานอล และปาล์มไบโอดีเซล อัตราส่วนผสมล่วงหน้าทางความร้อนของเชื้อเพลิงเอทานอลต่อความร้อนเชื้อเพลิงรวม อัตราส่วนผสมมวลของเชื้อเพลิงรวม เป็นต้น ส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิง และอัตราการไหลของอากาศจะกล่าวถึงในบทที่ 3 อุปกรณ์ และการทดลองต่อไป

2.5.2.1 อัตราส่วนผสมมวล(Equivalence ratio, ER, ϕ)

เพื่อลดพารามิเตอร์การประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์ CI ระบบเชื้อเพลิงร่วม จึง

นิยามค่าอัตราส่วนสมมูล คือ อัตราส่วนผสมโดยความร้อนของเชื้อเพลิงร่วมต่อเวลา ต่ออัตราการไหลโดยมวลของอากาศใช้จริงเทียบกับอัตราส่วนผสมโดยความร้อนของเชื้อเพลิงร่วมต่อเวลา ต่ออัตราการไหลโดยมวลของอากาศตามทฤษฎีดังสมการ 2.1

$$\phi = \frac{[\dot{Q}_f/\dot{m}_a]_{\text{actual}}}{[\dot{Q}_f/\dot{m}_a]_{\text{stoichiometric}}} \quad (2.1)$$

โดย $[\dot{Q}_f/\dot{m}_a]$ คือ อัตราส่วนผสมโดยความร้อนของเชื้อเพลิงร่วมต่อเวลา ต่ออัตราการไหลโดยมวลของอากาศ

actual คือ อัตราส่วนจริง

stoichiometric คือ อัตราส่วนทางทฤษฎี

ER สำหรับเชื้อเพลิงร่วมเอทานอลปาล์มไบโอดีเซล ER ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.1-0.6 (Lu et al., 2008) และกรณี ER=1 แสดงถึงการเผาไหม้สมบูรณ์ 100% การเผาไหม้จริงพอดีกับการเผาไหม้ทางทฤษฎี (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

2.5.2.2 อัตราส่วนผสมล่วงหน้าทางความร้อน (Premixed ratio, rp)

ใช้ในการปรับปริมาณเอทานอลที่ฉีดล่วงหน้าโดยเปรียบเทียบกับค่าพลังงานรวมที่ BMEP และความเร็วรอบเดียวกันกับค่าที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ระบบเชื้อเพลิงร่วม rp คือ 0 ไม่มีการฉีดเอทานอล ฉีดปาล์มไบโอดีเซลเพียงอย่างเดียว ที่ rp คือ 1 เครื่องยนต์ใช้เอทานอลอย่างเดียว

$$rp = \frac{m_E \times LHV_E}{m_E \times LHV_E + m_{BD} \times LHV_{BD}} \quad (2.2)$$

โดย rp คือ อัตราส่วนผสมล่วงหน้าทางความร้อนของเชื้อเพลิงร่วมเอทานอล ต่อเอทานอล และปาล์มไบโอดีเซล

m_E คือ ความสิ้นเปลืองเอทานอล (kg/cycle)

m_{BD} คือ ความสิ้นเปลืองและปาล์มไบโอดีเซล (kg/cycle)

LHV_E คือ ความร้อนต่ำของเอทานอล (MJ/kg)

LHV_{BD} คือ ความร้อนต่ำของปาล์มไบโอดีเซล (MJ/kg)

2.5.2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงร่วมเอทานอลและปาล์มไบโอดีเซล

ค่าความร้อนเทียบกับน้ำมันดีเซลมีค่าคงที่ ที่ความเร็วรอบและ BMEP เดียวกัน

$$\dot{Q}_f = m_{\text{Diesel}} \times LHV_{\text{Diesel}} \quad (2.3)$$

$$\dot{Q}_f = (\dot{m} \times LHV)_{\text{Ethanol}} + (\dot{m} \times LHV)_{\text{Palmbiodiesel}} \quad (2.4)$$

โดย \dot{Q}_f คือ อัตราค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิงร่วมต่อเวลา (MJ/h)

\dot{m} คือ อัตราการไหลโดยมวลของเชื้อเพลิง (kg/h)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

2.5.2.4 อัตราส่วนการอัด (CR)

ใช้กำหนดสมบัติทางเรขาคณิตของเครื่องยนต์แบบลูกสูบตั้งสมการ 2.5

$$CR = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.5)$$

โดย V_d คือ ปริมาตรกระจัด (m^3)

V_c คือ ปริมาตรช่องว่าง (m^3)

CR อัตราการอัดเครื่องยนต์ SI มีค่า 8-12 และเครื่องยนต์ CI มีค่า 12-24

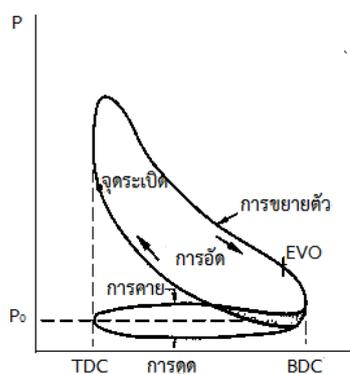
2.6 การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเชื้อเพลิงร่วม [10-12]

สมรรถนะ คือ ความสามารถในการทำงาน กำหนดโดยกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ที่จ่ายออกกำลังปกติที่ให้ออกมาจากการทำงานต่อเนื่องที่ความเร็วรอบกำหนด BMEP คือ 0, 143.2, 286.5, 429.7, 572.9 และ 716.2 kPa ที่ 1,200 1,500 และ 1,800 rpm η คือ 0-0.85 ที่ค่า ϕ คือ 0.15-0.50 ค่าสมรรถนะที่พิจารณา อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

2.6.1 กำลัง

2.6.1.1 กำลังบ่งชี้ (Indicated Power, P_i)

เป็นกำลังที่ถ่ายทอดจากแก๊สที่อยู่ภายในกระบอกสูบไปสู่ลูกสูบ กำลังบ่งชี้หาได้จากงานที่แก๊สถ่ายทอดภายในกระบอกสูบไปสู่ลูกสูบ ต่อวัฏจักร (Indicated Work Per Cycle, $W_{c,i}$) หาได้ด้วยการอินทิเกรตรอบกราฟระหว่างแกนความดัน และปริมาตรกระบอกสูบในกราฟ P-V ตลอด 1 วัฏจักรการทำงาน ภาพที่ 2.8 แสดงกราฟระหว่างความดัน และปริมาตรภายในกระบอกสูบหาได้จากอินดิเคเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ในการหากำลังบ่งชี้ นอกจากต้องหางานบ่งชี้แล้วต้องวัดอัตราเร็วรอบในการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยง กำลังบ่งชี้ต่อกระบอกสูบหาได้ ดังสมการ 2.6 และงานบ่งชี้หาได้ดังสมการ 2.7



ภาพที่ 2.8 กราฟระหว่างความดันและปริมาตรกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ นำไอดีเข้า โดยธรรมชาติ [10]

$$P_i = \frac{W_{c,i} N}{60 n_R} \quad (2.6)$$

$$w_{c,i} = \int p dV \quad (2.7)$$

โดย P_i คือ กำลังป้อน (kW)

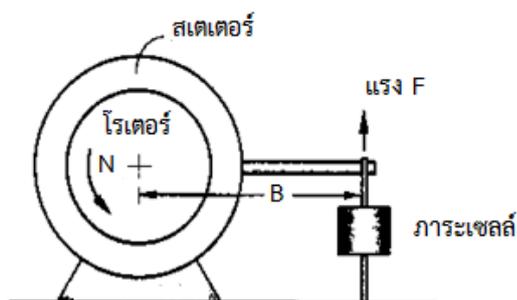
$w_{c,i}$ คือ งานป้อนต่อวัฏจักร (kJ)

N คือ อัตราเร็วรอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยง (rpm)

n_R เครื่องยนต์ 2 จังหวะคือ 1 เครื่องยนต์ 4 จังหวะคือ 2

2.6.1.2 กำลังเบรก (Brake power, P_b)

เป็นกำลังที่วัดได้ที่เพลาค้อเหวี่ยง เป็นกำลังของเครื่องยนต์ที่นำไปใช้งาน การวัดกำลังเบรกใช้ ไดนาโมมิเตอร์ ดังภาพที่ 2.9 วัดในรูปของแรง (Force, F) นำไปคำนวณแรงบิด (Torque, T) จากสมการ 2.8 วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ คำนวณกำลังม้าเบรกดังสมการ 2.9



ภาพที่ 2.9 หลักการทำงานของไดนาโมมิเตอร์ [10]

$$T = F \times B \quad (2.8)$$

$$P_b = \frac{2\pi \times N \times T}{60} \quad (2.9)$$

โดย P_b คือ กำลังเบรก (kW)

T คือ แรงบิดที่ได้จากเครื่องยนต์ (Nm)

F คือ ค่าภาระที่อ่านได้จากไดนาโมมิเตอร์ (Kg_f)

B คือ ความยาวแขนไดนาโมมิเตอร์ (m)

N คือ ความเร็วรอบเพลาค้อเหวี่ยงเครื่องยนต์ (rpm)

2.6.1.3 กำลังเสียดทาน (Friction power, P_f)

ผลรวมกำลังในการนำไอดีเข้า และนำไอเสียออก ค่ากำลังที่ใช้ในการขับอุปกรณ์

ต่างๆ ที่จำเป็นในการทำงานของเครื่องยนต์ และกำลังที่ใช้ในการเอาชนะแรงเสียดทานในชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์โดยมีค่าดังสมการ 2.10

$$P_f = P_i - P_b \quad (2.10)$$

โดย P_f คือ กำลังเสียดทาน (kW)

P_i คือ กำลังบ่งชี้ (kW)

P_b คือ กำลังเบรก (kW)

2.6.1.4 ความดันยังผลเฉลี่ย (Means Effective Pressure, MEP)

วัดแรงบิด ความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์โดย กำหนดค่า สมรรถนะ ในการเปรียบเทียบขึ้นคำนวณได้จากงาน ต่อวัฏจักร ต่อค่าปริมาตรการกระจัดในวัฏจักรในหน่วย kPa คือ ค่าความดันยังผลเฉลี่ย (MEP) งานที่ใช้คำนวณได้มาจากกำลังต่อรอบ ถ้าใช้กำลังบ่งชี้ ผลที่ได้เป็น (IMEP) ดังสมการ 2.11 ถ้าใช้กำลังเบรกก็จะได้ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (BMEP) ดังสมการ 2.12

$$\text{IMEP} = \frac{P_i \times 60 \times n_R}{N \times V_d} \quad (2.11)$$

$$\text{BMEP} = \frac{P_b \times 60 \times n_R}{N \times V_d} \quad (2.12)$$

โดย **BMEP** คือ ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (kPa)

IMEP คือ ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (kPa)

P_b คือ กำลังเบรก (kW)

P_i คือ กำลังบ่งชี้ (kW)

n_R คือ จำนวนรอบของเพลาคือเหวี่ยงที่ให้จังหวะกำลังต่อ 1 cycle

N คือ ความเร็วรอบเพลาคือเหวี่ยงของเครื่องยนต์ (rpm)

2.6.1.5 ประสิทธิภาพเชิงกล (Mechanical efficiency, η_m)

ขึ้นกับระบบที่ใช้แรงขับจากเครื่องยนต์ ทำให้ค่ากำลังเบรกแตกต่างจากค่ากำลังบ่งชี้มาก ประสิทธิภาพเชิงกลต่ำ หาได้จากอัตราส่วนกำลังเบรกต่อกำลังบ่งชี้ ดังสมการ 2.13

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} \times 100 \quad (2.13)$$

โดย η_m คือ ประสิทธิภาพเชิงกล (%)

P_b คือ กำลังเบรก (kW)

P_i คือ กำลังบ่งชี้ (kW)

2.6.1.6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency, η_{th})

เป็นค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเบรกที่เครื่องยนต์ส่งออก ต่อความร้อนรวมที่เกิดจากการสันดาปของน้ำมันเชื้อเพลิง ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังสมการ 2.14

$$\eta_{th} = \frac{P_b}{\dot{Q}_f} \times 100 \quad (2.14)$$

โดย η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)

P_b คือ กำลังเบรก (kW)

\dot{Q}_f คือ ค่าความร้อนรวมเชื้อเพลิง (kJ/sec) ดังสมการ 2.3

2.6.1.7 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก

Brake Specific Energy Consumption (BSEC) คือ พลังงานที่เผาไหม้ได้จากเชื้อเพลิงที่ใช้ไป ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต่อกำลังงานเบรกของเครื่องยนต์ ดังสมการ 2.15

$$BSEC = \frac{\dot{Q}_f}{P_b} \quad (2.15)$$

โดย BSEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (kJ/kWh)

\dot{Q}_f คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงรวม (kJ/h)

P_b คือ กำลังเบรก (kW)

2.6.1.8 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air Fuel Ratio, A/F)

คำนวณจากอัตราส่วนมวลอากาศที่ไหลเข้าต่อเวลาต่ออัตราการไหลโดยมวลของเชื้อเพลิงรวมที่ใช้ต่อเวลาดังสมการ 2.16 ในช่วงการทำงานปกติสำหรับเครื่องยนต์ CI ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีค่า $18 < A/F < 70$ และเครื่องยนต์ SI มีค่า $12 < A/F < 18$

$$A/F = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (2.16)$$

โดย A/F คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

\dot{m}_a คือ ปริมาณอากาศเข้ากระบอกสูบ (kg/s)

\dot{m}_f คือ อัตราส่วนสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/s)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในเครื่องยนต์ CI เกี่ยวกับเชื้อเพลิงรวมมีวัตถุประสงค์ เพื่อนำพลังงานทดแทนมาใช้แทนน้ำมันดีเซลเดิม เพิ่มสมรรถนะ ลดมลพิษจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การนำมาใช้มีความหลากหลาย ใช้กับแก๊สชีวภาพ แก๊สธรรมชาติ แก๊สหุงต้ม น้ำมันแก๊สโซลีน ใช้เป็น

เชื้อเพลิงร่วมกับเอทานอลเป็นส่วนผสมล่วงหน้ากับอากาศ จากการสืบค้นงานวิจัยระบบเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้อีเทนอลร่วมกับน้ำมันดีเซล หรือร่วมกับไบโอดีเซลมี 3 วิธี ในการผสมเชื้อเพลิงล่วงหน้า คือ ผสมด้วยคาร์บูเรเตอร์ ผสมโดยจ่ายอากาศร้อนผ่านเข้าไปในเอทานอลจนระเหยกลายเป็นไอ แล้วแพร่ผสมกับอากาศ และการฉีดเอทานอลเข้าไปในอากาศโดยตรงบริเวณท่อไอดีในจังหวะดูดแล้วทำการอัดไอดีจนมีอุณหภูมิ และความดันที่สูงพอที่เชื้อเพลิงฉีดจุดระเบิด คือ น้ำมันดีเซล หรือไบโอดีเซลสามารถจุดระเบิดด้วยตัวเอง สรุปตารางที่ 2.1 แสดงผลกระทบต่อค่าสมรรถนะ คุณลักษณะในการเผาไหม้ และตารางที่ 2.2 แสดงผลกระทบต่อมลภาวะ

2.7.1 งานวิจัยที่ใช้แก๊สโซลีนร่วมกับน้ำมันดีเซล

ในเครื่องยนต์ CI ระบบเชื้อเพลิงร่วม ใช้แก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิงฉีดล่วงหน้าผสมกับอากาศที่เข้ามาทางท่อไอดี และใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงจุดระเบิด

Chang Sik Lee et al. (2002) [13] ทำการทดลอง และคำนวณผลจากการใช้แก๊สโซลีนร่วมกับน้ำมันดีเซล ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมล่วงหน้าแก๊สโซลีน ต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ และค่ามลภาวะไอเสีย ทดลองในเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ฉีดตรง ดัดแปลงเครื่องยนต์ให้ใช้ได้กับเชื้อเพลิงร่วม และ EGR ควบคุมการฉีดแก๊สโซลีนผสมกับอากาศในท่อไอดีที่ตำแหน่ง 30 cm ก่อนถึงลิ้นไอดีในจังหวะดูด ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ฉีดน้ำมันดีเซลเข้าไปจุดระเบิดที่ -10°C

คุณลักษณะในการเผาไหม้ที่ศึกษา คือ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ อัตราการปลดปล่อยความร้อน ความล่าช้าในการจุดระเบิด มลภาวะไอเสียที่ศึกษาคือ NO_x และเขม่า ผลกระทบต่อปริมาณ EGR ที่ใช้กำหนดค่าอัตราส่วนผสม ϕ คือ 0.15–0.45 rp คือ 0-0.85 ที่ภาระร้อยละ 25–50 และ EGR คือ ร้อยละ 0-30

สรุปผลจากการทดลองและผลลัพธ์จากการคำนวณสอดคล้องกัน เมื่อ rp สูงขึ้น ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง ความล่าช้าในการจุดระเบิดเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิไอดี และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้หลังจุดระเบิดลดลง อัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลง เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดเพิ่มขึ้น NO_x ลดลง 1/10 และเขม่าลดลงเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ CI ที่ใช้น้ำมันดีเซลแบบเดิม

เมื่อดัดแปลง EGR หมุนเวียนกลับเข้ามาใช้ในท่อไอดี ทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง ส่งผลให้ NO_x ลดลง HC เพิ่มขึ้น HC ลดลงด้วยการเพิ่มปริมาณ EGR ให้สูงขึ้น ผลที่ได้จากการทดลอง ความคลาดเคลื่อนจากผลคำนวณเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการรั่วของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ การผสมกันของเชื้อเพลิงกับอากาศยังไม่สมบูรณ์ rp ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.6

2.7.2 งานวิจัยที่ใช้อีเทนอลร่วมกับน้ำมันดีเซล

ในเครื่องยนต์ CI ระบบเชื้อเพลิงร่วม ใช้อีเทนอลเป็นเชื้อเพลิงฉีดล่วงหน้าผสมกับอากาศเข้าทางท่อไอดี และใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงจุดระเบิด

Noboru Noguchi et al. (1996) [14] ศึกษาผลขององศาเพลาคือเอียงเริ่มต้นฉีดน้ำมันดีเซล เมื่อใช้ร่วมกับการฉีดล่วงหน้าเอทานอลร้อยละ 99.5 ต่อค่าสมรรถนะในการเผาไหม้ เพื่อทดลองหาองศาเพลาคือเอียงฉีดน้ำมันดีเซลที่เหมาะสมในระบบเชื้อเพลิงร่วม ทดลองในเครื่องยนต์ CI ของ Tractor ยี่ห้อ Ford รุ่น 960 E 3 สูบ 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยน้ำ ดัดแปลงระบบเชื้อเพลิงร่วมเครื่องยนต์ให้ใช้ได้กับเอทานอล และน้ำมันดีเซล ควบคุมด้วยการตรวจสอบภาระของเครื่องยนต์ สลับกับการควบคุมด้วยระบบ (Partial Load, PID) ใช้น้ำมันดีเซลชนิดเดียวในช่วงภาระต่ำ เพิ่มอัตราการ

ไหลของเอทานอลในช่วงภาระสูง สร้างระบบควบคุมปริมาณ อนุภาคน้ำมันดีเซล ควบคุมจังหวะ ในการฉีดเอทานอลด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Timing and Injection rate Control System, TICS) เป็นระบบ Line Injection Pump โดยไม่ต้องแปลงอัลกอริทึมระบบควบคุม จึงไม่มีผลต่อความเร็วรอบ เครื่อง แรงบิด TICS ออกแบบมาให้ควบคุมอัตราการไหลเอทานอล และน้ำมันดีเซล ด้วยมอเตอร์พัลส์ ควบคุมความเร็วรอบ แรงบิด การหยุดของเครื่องยนต์ ระบบควบคุมวัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ เมื่อมี ความเร็วรอบ และภาระสูง TICS เปลี่ยนไปใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วม โดยส่งสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่คอยล์แม่เหล็ก เมื่อวาล์วเปิดออกฉีดเอทานอลผสมกับอากาศระเหยเป็นไอที่มีค่าความร้อนแฝงสูงกว่าความร้อน แฝงในช่วงที่ไม่มีภาระ เปลี่ยนการฉีดเอทานอลตามความเร็วรอบเครื่องยนต์

ทดสอบค่าสมรรถนะ และมลภาวะของระบบเชื้อเพลิงร่วมด้วย PTO test ที่ 1,800 rpm และ 1,500 rpm ควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยระบบ TICS ที่ค่าภาระร้อยละ 80 ทดลองฉีด น้ำมันดีเซลที่ -5° , -7° และ -10° CA วัดอุณหภูมิ ความดัน ระดับเสียง ความดันยังผลเฉลี่ย BSHC และ NO_x เปรียบเทียบผลระบบเชื้อเพลิงร่วมกับการใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วรอบ เดียวกัน

ผลการทดลองพบว่าแรงบิดเพลามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วม ที่ 1,800 และ ที่ 1,500 rpm อุณหภูมิ และความดันในห้องเผาไหม้ลดลง ระดับเสียงสูงขึ้นเล็กน้อย ค่า BSHC ที่แรงบิด เพลาส่งค่าสูงขึ้น ค่าความดันยังผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.5 และ NO_x ลดลงร้อยละ 51 อนุภาคน้ำมันดีเซลเดิมตั้งค่าจากโรงงานที่ -20° CA เมื่อเครื่องยนต์ทำงานในระบบเชื้อเพลิงร่วม จึงทดลอง เลื่อนองศาเพลาช้อเหวี่ยงเริ่มฉีดน้ำมันดีเซลออกไปเป็น -10° CA พบว่ามีการปล่อยความร้อนสูงสุด ใกล้ TDC เกิดความดันสูงสุดในช่วงที่ลูกสูบเคลื่อนไปถึงตำแหน่งก่อน TDC เสียงต่อการน็อก เมื่อเลื่อน เป็น -5° CA การจุดระเบิดเกิดหลัง TDC มากทำให้สูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ สูญเสียความร้อน จากการ ปล่อยความร้อนล่าช้า ตำแหน่งฉีดน้ำมันดีเซลที่เหมาะสมอยู่ที่ -7° CA

Zhang Bo et al. (2005) [15] ศึกษาผลกระทบการใช้ DME และเอทานอล สลับเป็น เชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลต่อค่า BSFC และอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซล ทดลองกับเครื่องยนต์ CI ฉีด ตรง 1 สูบ 4 จังหวะ (Dimethyl ether, DME) เป็นเชื้อเพลิงที่สังเคราะห์ได้จากถ่านหิน สูตรโมเลกุล เหมือนกับเอทานอล และใช้เอทานอลสลับเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซล

ในช่วงเริ่มต้นทำ DME ให้ร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 1000 K มีสถานะเป็นไอ ใช้กับน้ำมันดีเซลที่ มีน้ำผสม และเปลี่ยนกลับไปใช้เอทานอล นำไอเสียของเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิ 750 K มาให้ความร้อน แก่เอทานอลจนกลายเป็นไอ แล้วป้อนกลับเข้าไปในท่อไอดี ใช้ร่วมกับน้ำมันดีเซล

ผลเมื่อนำ DME ที่ 1000 K สถานะไอจ่ายเข้าท่อไอดีใช้กับน้ำมันดีเซลที่มีน้ำผสม BSFC ลดลงร้อยละ 10 และอัตราการใช้น้ำมันดีเซลลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้เอทานอลที่ 750 K สถานะไอ ป้อนเข้าไปในท่อไอดี BSFC เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ลดการใช้น้ำมันดีเซลลงร้อยละ 16

ทั้ง DME และเอทานอลสามารถลดอัตราการใช้น้ำมันดีเซลลง ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ เมื่อ ใช้ DME ค่า BSFC ลดลง เพราะในกระบวนการใช้น้ำมันผสมน้ำกลายเป็น Emulsified Fuel เกิดการ ทำ Pyrolysis ในสภาวะอับออกซิเจนในเชื้อเพลิงร่วม เกิดแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นในการเผาไหม้โดยตรง เมื่อเปลี่ยนมาใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซล เมื่อเทียบกับ DME ค่า BSFC เพิ่มขึ้น เนื่อง จากในกระบวนการไม่เกิด Pyrolysis

Cenk Sayin et al. (2008) [16] ศึกษาผลกระทบขององศาการฉีดน้ำมันดีเซล ในระบบเชื้อเพลิงร่วมเอทานอล และน้ำมันดีเซล ต่อค่ามลภาวะไอเสีย ทดลองในเครื่องยนต์ CI ฉีดตรง 1 สูบ 4 จังหวะ ที่ติดตั้งระบบฉีดเอทานอลเข้าทางท่อไอดี

ทดลองโดยฉีดเอทานอลในอัตราร้อยละ 0-15 ต่อการใช้น้ำมันดีเซล เปลี่ยนองศาการฉีดน้ำมันดีเซลทีละ 3 °CA จากเดิมฉีด ที่ -27 °CA ทดสอบการฉีด ที่ -21, -24, -27, -30 และ -33 °CA ค่ามลพิษไอเสียที่ศึกษาคือ NO_x, CO₂, HC และ CO

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการฉีดเอทานอล NO_x และ CO₂ เพิ่มขึ้น HC และ CO ลดลง เมื่อเทียบกับองศาการฉีดเชื้อเพลิงเดิม เมื่อเปลี่ยนองศาการฉีด NO_x และ CO₂ เพิ่มขึ้น HC และ CO ลดลงในทุกองศาทดสอบ

Bhupendra singh chauhan et al. (2011) [17] ทดลองระบบเชื้อเพลิงร่วมเอทานอล น้ำมันดีเซล ศึกษาผลของการใช้เอทานอล ต่อค่าสมรรถนะและมลพิษไอเสีย ทดลองกับเครื่องยนต์ CI ที่ติดตั้งคาร์บูเรเตอร์กับท่อไอดี เพื่อหาปริมาณการใช้เอทานอลที่เหมาะสม ที่ภาระคงที่ ทดลองเปลี่ยนส่วนผสมร้อยละค่าความร้อนของเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวม ค่าสมรรถนะ คือ อัตราการทดแทนน้ำมันดีเซล ค่ามลพิษไอเสียที่ศึกษาคือ NO_x, CO, CO₂ และ HC ตกค้าง

เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยออกซิเจนที่มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการเผาไหม้ลดลง ลดการใช้ น้ำมันดีเซลลง ค่าสมรรถนะสูงขึ้น ค่าอุณหภูมิเผาไหม้ และอุณหภูมิไอเสียลดลง NO_x, CO และ CO₂ ลดลง HC ตกค้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้ไม่หมด อัตราส่วนทางความร้อนที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 15

Alberto Boretti et al. (2012) [18] ศึกษาผลจากการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ CI ระบบเชื้อเพลิงร่วม ต่อค่าสมรรถนะ และค่ามลภาวะไอเสีย

ทดลองในเครื่องยนต์ CI ของรถบรรทุกขนาดใหญ่ เปลี่ยนระบบน้ำมันจากเครื่องยนต์ CI ใช้ น้ำมันดีเซลอย่างเดียวมาเป็นระบบเชื้อเพลิงร่วมเอทานอลและน้ำมันดีเซล อัตราส่วนผสมทางความร้อนของเอทานอลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงรวมร้อยละ 5-95 สมรรถนะที่ศึกษา คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และ BMEP ค่ามลภาวะไอเสียที่ศึกษา คือ CO₂ เชื้อเพลิงร่วมเอทานอลน้ำมันดีเซล มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงร้อยละ 40 BMEP มีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียง 30 บาร์ จากเดิม 25 บาร์ ลดการปล่อย CO₂ ลง

Srinivas Padala et al. (2013) [19] ศึกษาผลจากการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนผสมล่วงหน้า ต่อค่าสมรรถนะ คุณลักษณะ และมลภาวะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI เชื้อเพลิงร่วมเอทานอลน้ำมันดีเซล ทดลองในเครื่องยนต์ CI ฉีดตรง 1 สูบ 4 จังหวะ ภาระปานกลาง เปลี่ยนอัตราส่วนผสมล่วงหน้า ที่ ร้อยละ 0-60 สมรรถนะที่ศึกษา คือ ประสิทธิภาพ และกำลัง คุณลักษณะในการเผาไหม้ คือ การปลดปล่อยพลังงานความร้อน มลภาวะในการเผาไหม้ คือ HC, CO และ NO_x ปรับองศาการฉีดน้ำมันดีเซล เพื่อหาค่าที่เหมาะสมเมื่อใช้ร่วมกับเอทานอล

เมื่อเพิ่มปริมาณการฉีดเอทานอล จนมีอัตราส่วนทางความร้อนของเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวมร้อยละ 60 กำลังลดลง ประสิทธิภาพลดลงมีค่าสูงสุดร้อยละ 10 การปลดปล่อยพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเลื่อนองศาการฉีดน้ำมันดีเซลไป 10 °CA อัตราส่วนผสมทางความร้อนเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวมร้อยละ 60 ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณ HC, CO และ NO_x เพิ่มขึ้น

2.7.3 งานวิจัยที่ใช้เอทานอลร่วมไบโอดีเซล

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์ CI ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงร่วม ผสมล่วงหน้ากับอากาศเข้าทางท่อไอดี และใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงจุดระเบิด

Xingcai Lu et al. (2008) [20] ศึกษา สมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลภาวะไอเสียในเครื่องยนต์ CI เชื้อเพลิงร่วมเอทานอล และไบโอดีเซล ทดลองกับเครื่องยนต์ CI ฉีดตรง 1 สูบ 4 จังหวะ ติดตั้งอุปกรณ์ฉีดเอทานอลที่พอร์ทไอดี ความเร็วรอบคงที่ อัตราส่วนผสมล่วงหน้าทางความร้อนของเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 20-40

ศึกษา ค่าสมรรถนะ คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนอินดิเคต (ITE) คุณลักษณะ คือ ค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานสูงสุด อุณหภูมิ และความดันสูงสุด มลพิษ คือ ควีน และ NO_x ที่ส่วนผสมบาง พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมทางความร้อนของเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวมสูงขึ้น อนุภาคการจุดระเบิดจะเลื่อนออกไป ค่า ITE และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิ และความดันมีค่าลดลง ที่ส่วนผสมหนา เมื่อเอทานอลเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 40 ITE มีค่าสูงสุด อัตราการปลดปล่อยความร้อนมีค่าสูงสุด ควีน และ NO_x ลดลงร้อยละ 30-85 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบต่อสมรรถนะ และคุณลักษณะในการเผาไหม้

Researchers	Testing Fuel	Results Compared with Diesel				
		rp	BSHC	%Eff.	Injection Timing	HRR _{max}
Noboru No. et al.(1996)	Die.+Eth.	0.38	เพิ่มขึ้น	-	-7 °CA	ลดลง
Chang Sik Lee (2003)	Diesel + Gasoline	0.85	-	-	-	ลดลง
Zhang Bo et al.(2005)	Die.+Eth. Heat750K	0.16	เพิ่มขึ้น 10%	-	-	-
Cenk Sayin et al.(2008)	Die.+Eth.	0 to 0.15	-	-	-21 °CA	-
Xingcai Lu et al.(2008)	Bio.+Eth.	0.40	-	เพิ่มขึ้น	เลื่อนเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น
Bhupenda Sigh Chauhan et al. (2011)	Die.+Eth. carburetor	0.15	-	เพิ่มขึ้น	-	-
Alberto Boretti (2012)	Die.+Eth.	0.05 to 0.95	-	40%	-	-
Padala S. et al. (2013)	Die.+Eth.	0.60	-	10%	-	เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.2 สรุปผลกระทบต่อมลภาวะไอเสีย

Researchers	Testing Fuel	Results Compared with Diesel					
		rp	CO	CO ₂	NO _x	HC	Smoke
Noboru No. et al.(1996)	Die.+Eth.	0.38	-	-	ลดลง 51%	-	-
Chang Sik Lee (2002)	Die.+Gasol	0.85	-		ลดลง	เพิ่มขึ้น เล็กน้อย	ลดลง
Cenk Sayin et al.(2008)	Die.+Eth.	0 to 0.15	ลดลง	เพิ่ม	เพิ่มขึ้น	ลดลง	-
Xingcai Lu et al. (2008)	Bio.+Eth.	0.40	-	-	ลดลง 85%	-	ลดลง 30%
Bhupenda Singh Chauhan et al.(2011)	Die.+Eth. carburetor	0.15	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	-
Alberto Boretti (2012)	Die.+Eth.	0.05 to 0.95	-	ลดลง	-	-	-