

การทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้และการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล  
ที่มีการปรับอัตราส่วนการอัดโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล



นายยงศธร โคตบุตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**PERFORMANCE TESTING OF COMBUSTION AND  
EXHAUST EMISSION ON VARIABLE COMPRESSION  
RATIO DIESEL ENGINES USING DIESEL  
AND BIODIESEL FUEL**



**Yongsathon Khotbut**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical and  
Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2019**

การทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้และการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล  
ที่มีการปรับอัตราส่วนการอัดโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.การุญ พingssuwanrath)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ชโยธร ธรรมแท้)

กรรมการ



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

กรรมการ



(อ. ดร.ธีทัต ดลวิชัย)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ยงศธร โคตบุตร : การทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้และการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีการปรับอัตราส่วนการอัดโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล (PERFORMANCE TESTING OF COMBUSTION AND EXHAUST EMISSION ON VARIABLE COMPRESSION RATIO DIESEL ENGINES USING DIESEL AND BIODIESEL FUEL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์, 250 หน้า.

ในปัจจุบันการพัฒนาประเทศและการเติบโตทางเศรษฐกิจได้เกิดอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีการใช้รถบรรทุกในการขนส่งสินค้าและใช้เครื่องยนต์สำหรับทำการเกษตรโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีประสิทธิภาพสูงทำให้มีการใช้เชื้อเพลิงดีเซลอย่างแพร่หลาย แต่การใช้เชื้อเพลิงดีเซลจากฟอสซิลมีการปลดปล่อยมลพิษฝุ่นละออง PM2.5 เป็นจำนวนมาก และจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเชื้อเพลิงไบโอดีเซลใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงดีเซลพบว่า การใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสมเชื้อเพลิงดีเซลช่วยลดฝุ่นควันดำได้เป็นอย่างดี และช่วยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วไบโอดีเซลมีคุณสมบัติทางด้านความหนืดและเอนทัลปีของการระเหยตัวที่สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลส่งผลให้การฉีดผสมเชื้อเพลิงเข้ากับอากาศมีความเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดการเผาไหม้ได้น้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งการระเหยตัวได้ยากของไบโอดีเซลจำเป็นต้องใช้ความร้อนในห้องเผาไหม้ที่มากขึ้นเพื่อที่จะช่วยให้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลระเหยตัวได้ดีขึ้น โดยการเพิ่มอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ด้วยการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากพืชที่แตกต่างกัน 3 ชนิด

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาสมรรถนะ การเผาไหม้ และการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ โดยใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากพืชที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม (POB100), ไร่ข้าว (RBB100) และมะพร้าว (COB100) ทดสอบโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ 1 สูบ ชนิดนำไอดีเข้าโดยไร้ระบบอัดอากาศ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที อัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 และเปลี่ยนแปลงโหลดที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ทั้งนี้ การผลิตเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากเชื้อเพลิงพืชทั้ง 3 ชนิด ได้ใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จากการผลิตโดยใช้กระบวนการดังกล่าวพบว่า ผลผลิต (%Yield) ของจากการทำปฏิกิริยา POB100 มีค่าสูงที่สุด 96.36% และผลการตรวจวัดคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากเชื้อเพลิงพืชทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ, ความหนาแน่น, ความหนืด, การกลั่น, ดัชนีซีเทน และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง พบว่า COB100 มีความโดดเด่นในด้านความหนืดที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งต่างจาก POB100 และ RBB100 ที่มีค่าความหนืดสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งคุณสมบัติเชื้อเพลิงจะส่งผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้, สมรรถนะเครื่องยนต์

และการปล่อยมลพิษโดยตรง จากผลการทดสอบคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล เทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลพบว่า POB100 และ COB100 มีความล่าช้าในการจุดระเบิด (ID) มีค่าสั้นกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และสอดคล้องกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ของ POB100, COB100 มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล สำหรับการปล่อยมลพิษในโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ของ POB100 และ RBB100 มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล แต่ COB100 มีค่าที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) POB100, RBB100 และ COB100 มีค่าที่สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ไฮโดรคาร์บอน (HC) เชื้อเพลิง POB100 และ RBB100 มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล แต่ COB100 มีการปล่อยต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย 0.20% และการปล่อยควันดำ (Smoke Opacity) พบว่า POB100, RBB100 และ COB100 มีการปลดปล่อยที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการนำเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงอาจจะยังไม่เหมาะสมมากนัก

ด้วยผลจากการวิจัยข้างต้นนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาผลกระทบของการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลดีเซลผสมที่สัดส่วน 20% และ 40% โดยปริมาตร ตามลำดับ โดยทดสอบกับเครื่องยนต์เดียวกันกับการทดสอบก่อนหน้า ซึ่งผลการทดสอบพบว่า POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 โดยเฉลี่ยทั้ง 3 อัตราส่วนการอัด มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และมีค่า BTE สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ในส่วนของ BSFC ของ POB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล อย่างไรก็ตามสำหรับ RBB40 และ COB40 มีค่า BSFC สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย ในด้านการปล่อยมลพิษ  $\text{NO}_x$  ของเชื้อเพลิง B20 และ B40 มีแนวโน้มต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล การปล่อย CO มีแนวโน้มต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล การปล่อย HC มีแนวโน้มต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และการปล่อยควันดำมีแนวโน้มต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งการปล่อยควันดำของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสมเชื้อเพลิงดีเซลช่วยลดควันได้อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาผลของการปรับอัตราส่วนการอัด 16:1 เป็น 18:1 พบว่า ช่วยปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษที่ดีขึ้น โดยเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงทุกโหลด ความล่าช้าในการจุดระเบิดลดลง 16.40%, BTE เพิ่มขึ้น 5.98% และ BSFC ลดลง 4.93% การปล่อยมลพิษ CO ลดลง 32.08%, การปล่อยมลพิษ HC ลดลง 29.40%, การปล่อยควันดำลดลง 44.06% แต่การปล่อยมลพิษ  $\text{NO}_x$  เพิ่มขึ้น 22.20% ซึ่งโดยรวมการปรับอัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มสมรรถนะของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลให้ดีขึ้นใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซล โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล มีผลอย่างมีนัยสำคัญ เช่น RBB100 มีผลการเปลี่ยนแปลง BTE เพิ่มขึ้นจากการปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 ถึง 33.62% และ BSFC ลดลง 25.68%

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

YONGSATHON KHOTBUT : PERFORMANCE TESTING OF COMBUSTION  
AND EXHAUST EMISSION ON VARIABLE COMPRESSION RATIO  
DIESEL ENGINES USING DIESEL AND BIODIESEL FUEL. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. KAROON FANGSAWANARAK, Ph.D., 250 PP.

BIODIESEL/COMPRESSION RATIO/PERFORMANCE/COMBUSTION/EMISSION

In general, biodiesel has higher viscosity and enthalpy properties than diesel fuel. Resulting in a homogeneous fuel injection into the air and generate less combustion than diesel fuel. The difficult evaporation of biodiesel requires more heat in the combustion chamber to help the biodiesel fuel evaporate better. By increasing the compression ratio of the engine to the use of biodiesel fuel from 3 different plants

Therefore, the researcher is interested to study the combustion capacity and exhaust gas emission of diesel engines at various compression ratios using biodiesel from all 3 vegetable fuels, namely Palm (POB100), Rice Bran (RBB100) and Coconut (COB100) tested under the conditions at speeds of 1,500 rpm, the compression ratio of 16:1 to 18:1 and change the load at 25% to 100% and in the production of biodiesel fuel from All 3 fuel fuels used the transesterification process from the production. Using that process, the yield (% Yield) of the POB100 reaction was the highest 96.36% and From the test of combustion characteristics of biodiesel fuel compared with diesel fuel, it was found that POB100 and COB100 had the ID which was shorter than diesel fuel. And in accordance with BTE at various compression ratios of POB100, COB100 is higher than diesel fuel. NO<sub>x</sub> emissions of POB100 and RBB100 are higher than diesel fuels, but COB100 is lower than diesel fuels. CO emissions of POB100, RBB100, and COB100 have higher values than diesel fuel at various compression ratios. HC fuels

POB100 and RBB100 are higher than diesel fuels, but COB100 has lower emissions than diesel fuels. Slightly 0.20% and smoke opacity shows that POB100, RBB100, and COB100 have significantly lower emission than diesel fuel. It can be seen that the direct use of biodiesel fuel with diesel engines may not be suitable.

With the results of the above research, the researcher is interested to study the effects of fuel use. Biodiesel, diesel mixed at a proportion of 20% and 40% by volume respectively, tested with the same engine as the previous test. The test results showed that B40 and B20 on average, all 3 compression ratios. There is a delay in the ignition. Less than diesel fuel and BTE higher than BSFC diesel fuel. POB40, POB20, RBB20, and COB20 are lower than diesel fuel, but for RBB40 and COB40, BSFC is slightly higher than diesel fuel. In terms of emissions, NO<sub>x</sub> emissions of B20 and B40 fuels tend to be lower than diesel fuels. CO, HC and Smoke emissions tend to be lower than diesel fuels. When considering the effect of adjusting the compression ratio of 16:1 to 18:1, it was found that its improved performance and improved emissions. On average, every fuel, every load ID decreased by 16.40%, BTE increased by 5.98% and BSFC decreased by 4.93%. CO emissions decreased by 32.08%, HC emissions decreased by 29.40%, smoke emission decreased by 44.06% but for NO<sub>x</sub> emissions increased by 22.20%. In summary, an increased compression ratio to improve the performance of biodiesel fuel close to diesel fuel. In particular, fuels with a higher viscosity than diesel fuels have a significant effect. For example, RBB100 has a BTE effect that increases from adjusting the compression ratio 16 to 18 to 33.62%, and BSFC decreasing by 25.68%.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature

Advisor's Signature

*Yods Thap*

*Koroon*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาช่วยเหลือ การส่งเสริม ทักษะ การคิดและขัดเกลาองค์ความรู้ในการวิจัย จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์ อาจารย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ซึ่งข้าพเจ้า รู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้เกียรติและเสียสละมาเป็นประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ให้กับข้าพเจ้าในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชโลธร ธรรมแท้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค และอาจารย์ ดร.ธิตต์ คลวิชัย ที่ได้ให้เกียรติและเสียสละ มาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณคำแนะนำ ตลอดจนแนวทางต่าง ๆ ตั้งแต่การสอบ โครงร่างจนกระทั่งสอบวิทยานิพนธ์ เพื่อนำมาช่วยปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยให้ดีขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ต่าง ๆ อันข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนาม ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทางด้าน วิชาการแก่ข้าพเจ้า รวมทั้งผู้ที่ได้เขียนตำราให้ข้าพเจ้าได้ค้นคว้า อ้างอิง จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับดำเนินการวิจัย รวมถึงเครื่องมือและ อุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ กัลยาณมิตรของข้าพเจ้าที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัย มาโดยตลอด และขอขอบคุณว่าที่ร้อยตรี สมเกียรติ หมายถมกลาง ที่คอยให้คำแนะนำด้านการศึกษา และให้ประสบการณ์ในการทำวิจัยรวมทั้งแนวทางการดำเนินงานต่าง ๆ มากมาย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าที่ท่านช่วย สนับสนุนในด้านการศึกษาก่อข้าพเจ้า ตลอดจนคอยช่วยเหลือเป็นกำลังใจสำคัญของข้าพเจ้าเสมอ มาทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ยงศธร โคนบุตร



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	5
<b>2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	6
2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, SG).....	6
2.1.2 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity) .....	7
2.1.3 การกลั่น (Distillation).....	8
2.1.4 ดัชนีซีเทน (Cetane Index) .....	9
2.1.5 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value) .....	11
2.1.6 ความบริสุทธิ์ (Purity) .....	11
2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	14

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1	ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล.....	14
2.2.2	ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....	17
2.3	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	20
2.3.1	แรงบิด (Torque).....	20
2.3.2	กำลังเบรก (Brake Power).....	21
2.3.3	ความดันยังผลเฉลี่ย.....	21
2.3.4	ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ.....	22
2.3.5	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	22
2.3.6	ความดันในกระบอกสูบ.....	23
2.3.7	อัตราการปลดปล่อยความร้อน.....	23
2.4	เครื่องยนต์ดีเซลและอัตราส่วนการอัด.....	24
2.4.1	รูปแบบของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล.....	24
2.4.2	ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด.....	28
2.4.3	สหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิดในเครื่องยนต์.....	33
2.4.4	อัตราส่วนการอัด.....	34
2.5	พืชน้ำมันที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	40
2.5.1	ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm).....	40
2.5.2	น้ำมันมะพร้าว (Coconut Oil).....	41
2.5.3	น้ำมันรำข้าว (Rice bran Oil).....	44
2.6	ไบโอดีเซล.....	45
2.6.1	บทนำ.....	45
2.6.2	เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล.....	46
2.6.3	กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	48
2.6.4	การนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์.....	49
2.6.5	การเกิดมลพิษในเครื่องยนต์.....	52
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>61</b>
3.1	การผลิตน้ำมันไบโอดีเซล.....	61
3.2	ขั้นตอนการผสมน้ำมันประเภทต่าง ๆ.....	66
3.3	การทดสอบคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง.....	68
3.3.1	การทดสอบความหนืดของน้ำมันทดสอบ .....	68
3.3.2	การทดสอบความถ่วงจำเพาะ .....	70
3.3.3	การทดสอบการกลั่น .....	71
3.3.3.1	อุปกรณ์ทดสอบ .....	71
3.3.3.2	วิธีการทดสอบ .....	72
3.3.4	การทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิง.....	73
3.3.4.1	อุปกรณ์ทดสอบ .....	73
3.3.4.2	วิธีการทดสอบ .....	74
3.3.5	การหาค่าดัชนีซีเทน (Cetane Index) .....	76
3.3.6	การทดสอบค่าความบริสุทธิ์หรือมีปริมาณเมทิลเอสเตอร์ .....	77
3.4	การทดสอบการวัดมลพิษ .....	83
3.4.1	เครื่องยนต์ดีเซลสำหรับใช้ในการทดสอบ .....	83
3.4.2	การทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษและอัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงจำเพาะเบรค .....	84
3.5	การทดสอบสมรรถนะ .....	89
<b>4</b>	<b>ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>91</b>
4.1	บทนำ .....	91
4.2	การผลิตและผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	91
4.2.1	การหาค่าความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล.....	94
4.3	การวัดและผลคุณสมบัติของน้ำมัน.....	99
4.3.1	ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity).....	104
4.3.2	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity).....	105

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3	อุณหภูมิการกลั่นที่ 50% ของตัวอย่างน้ำมัน (Distillation at 50% recovered).....	106
4.3.4	ดัชนีซีเทน (Cetane Index).....	107
4.3.5	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value).....	109
4.4	คุณลักษณะการเผาไหม้.....	110
4.4.1	เปรียบเทียบผลจากภาระกรรมที่เปลี่ยนไปต่อคุณลักษณะ การเผาไหม้.....	110
4.4.2	เปรียบเทียบผลจากการปรับอัตราส่วนการอัดต่อคุณลักษณะ การเผาไหม้.....	114
4.4.3	เปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของดีเซลผสม B100 เทียบกับดีเซล.....	116
4.4.4	เปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของดีเซลผสม B40 เทียบกับดีเซล.....	121
4.4.5	เปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของดีเซลผสม B20 เทียบกับดีเซล.....	125
4.4.6	สหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิด.....	132
4.5	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลสมรรถนะเครื่องยนต์.....	137
4.5.1	ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC).....	137
4.5.2	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE).....	140
4.6	มลพิษไอเสีย.....	148
4.6.1	การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ).....	148
4.6.2	การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO).....	150
4.6.3	การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC).....	152
4.6.4	การปล่อยควัน (Smoke Opacity).....	154
4.7	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	166
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	168

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1	สรุปผลการวิจัย.....	168
5.1.1	การผลิตและผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	169
5.1.2	คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	169
5.1.3	คุณลักษณะการเผาไหม้.....	171
5.1.4	สมรรถนะของเครื่องยนต์.....	173
5.1.5	สหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิด.....	176
5.1.6	มลพิษไอเสีย.....	176
5.1.7	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	181
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	182
	รายการอ้างอิง.....	183
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	187
	ภาคผนวก ข. ผลการตรวจวัดมลพิษไอเสีย.....	194
	ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	203
	ประวัติผู้เขียน.....	250

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล..... 15
2.2	ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ของกรดไขมัน ..... 17
2.3	สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการอัด..... 38
2.4	วิธีการผลิตไบโอดีเซลจากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ ..... 49
2.5	คุณสมบัติเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ผลิตจากวัตถุดิบต่าง ๆ ..... 50
2.6	องค์ประกอบของกรดไขมันในไบโอดีเซล ..... 50
3.1	สัดส่วนในการผสมน้ำมันประเภทต่าง ๆ..... 67
3.2	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ ..... 83
4.1	ผลการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิดด้วยปฏิกิริยา ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ..... 93
4.2	สัดส่วนในการผสมน้ำมันประเภทต่าง ๆ..... 94
4.3	กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ..... 96
4.4	กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว..... 97
4.5	กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว ..... 98
4.6	คุณสมบัติของน้ำมันประเภทต่าง ๆ ..... 100
4.7	เปรียบเทียบร้อยละการเพิ่มขึ้น-ลดลงของคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (ใช้น้ำมันดีเซลเป็นมาตรฐาน) ..... 102
4.8	เปรียบเทียบการทำนายความล่าช้าในการจุดระเบิด ..... 135
4.9	ผลการทดสอบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ที่โหลดสูงสุด ..... 147
4.10	ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ที่โหลดสูงสุด..... 147
4.11	ต้นทุนของน้ำมันพืชและสารเคมีสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณ 1 ลิตร ..... 167
4.12	ต้นทุนของน้ำมันไบโอดีเซลแต่ละประเภทเทียบกับน้ำมันดีเซล..... 167

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การวัดค่าความถ่วงจำเพาะด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)..... 7
2.2	เครื่องมือ Viscosity-Kinematic Capillary Tempering Bath High Temperature ..... 8
2.3	เครื่องมือ Distillation at Atmospheric Pressure..... 9
2.4	โนโมกราฟ (Nomograph) สำหรับการหาค่าดัชนีซีเทน ..... 10
2.5	เครื่องมือ Bomb Calorimeter รุ่น Bomb C5000 ..... 11
2.6	เครื่องมือโครมาโทกราฟี (Chromatography) ..... 12
2.7	หลักการทำงานของเครื่องโครมาโทกราฟี..... 14
2.8	หลักการวัดแรงบิดด้วยไดนาโมมิเตอร์..... 20
2.9	ความดันกระบอกสูบ (p) ระยะยกของวาล์วเข็มในหัวฉีด ( $I_N$ ) และความดัน เชื้อเพลิงในท่อส่ง ( $p_f$ ) ที่เป็นฟังก์ชันของมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ดีเซล ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงขนาดเล็ก..... 25
2.10	ความดันกระบอกสูบ (p), อัตราการฉีดเชื้อเพลิง ( $m_f$ ) และอัตราการปล่อย ความร้อน ( $Q_f$ ) ที่คำนวณจากความดันกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซล ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงขนาดเล็กทำงานที่อัตราเร็ว 1,000 rev/min, จังหวะการฉีดตามปกติ และ $b_{mep} = 620$ kPa..... 26
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการเผาไหม้หรือ ปล่อยพลังงาน ..... 27
2.12	อัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงทั่วไป แสดงช่วงต่าง ๆ ของการเผาไหม้ ..... 27
2.13	ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่วัดได้ในเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรงสี่จังหวะขนาดเล็กที่มี $rc = 16.5$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของภาระที่ 1,980 rev/min เชื้อเพลิงมีเลขซีเทน 30, 39 และ 52..... 29
2.14	ผลของความดันและอุณหภูมิของอากาศที่นำเข้ากับความล่าช้าในการจุดระเบิด ตลอดช่วงภาระของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรงขนาดเล็กที่ 1,980 rev/min ..... 30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 ผลของการกระทบของสเปร์ย์บนผนังที่อยู่ห่าง 100 mm จากหัวฉีดที่มีต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดจากการศึกษาการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบปริมาตรคงตัว .....	31
2.16 ผลของความหนาแน่นของออกซิเจนในแก๊สที่มีต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ ระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรงสูบเดี่ยวขนาด 1.3 dm <sup>3</sup> , rc = 15 ที่ 1,800 rev/min ความหนาแน่นของออกซิเจนเปลี่ยนแปลงโดยแก๊สไอเสียที่นำกลับมาใช้อีก (EGR) ที่ความหนาแน่นเข้าคงตัว และโดยเปลี่ยนแปลงความดันเข้าจาก 0.5 ถึง 3 atm โดยใช้อากาศ .....	32
2.17 ค่า n สำหรับกระบวนการอัดแบบพอลิทโรปิกในสมการที่ 2.13 และอุณหภูมิอากาศที่สิ้นสุดการอัด (ที่ TC) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรงที่อุ่นแล้วและที่เย็นระยะชักเท่ากับ 130 mm .....	34
2.18 ระยะการอัดตัวของลูกสูบ เพื่ออธิบายอัตราส่วนการอัด .....	35
2.19 กราฟการลุกไหม้ของเชื้อเพลิง หากอุณหภูมิของเชื้อเพลิงสูงกว่าอุณหภูมิลุกไหม้เอง (SIT) เชื้อเพลิงจะลุกไหม้หลังช่วงเวลาหนึ่ง (ID) ยิ่งอุณหภูมิสูงกว่า SIT ช่วง ID ก็จะยิ่งสั้นลงซึ่งโดยทั่วไปจะกินเวลาไม่กี่ส่วนในพันส่วนของวินาที .....	36
2.20 ปาล์มน้ำมัน ก) ต้นปาล์มน้ำมัน ข) ผลปาล์มน้ำมัน .....	40
2.21 น้ำมันมะพร้าวและลูกมะพร้าว .....	44
2.22 น้ำมันรำข้าว .....	45
2.23 กลไกการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	47
2.24 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	48
2.25 ผลกระทบการปล่อยมลพิษเฉลี่ยของไบโอดีเซล .....	53
3.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	61
3.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช .....	62
3.3 ขั้นตอนการทำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช .....	63
3.4 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	66



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	ลักษณะของน้ำมันดีเซลที่ผสมเข้ากับน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วนต่าง ๆ .....67
3.6	การประกอบหลอดแก้วรูเล็กกับขาขีดและตั้งค่าอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ .....69
3.7	ตำแหน่งการจับเวลาสำหรับวัดความหนืด.....69
3.8	การจุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงในกระบอกตวง.....70
3.9	ชุดทดสอบค่าอุณหภูมิของการกลั่น .....71
3.10	การให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบ Front-View .....72
3.11	เครื่องมือ Bomb Calorimeter รุ่น Bomb C5000 .....73
3.12	เครื่องมือ Gas Chromatography (GC) รุ่น Agilent 7890A .....82
3.13	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเครื่องยนต์ .....85
3.14	เครื่องยนต์ดีเซล RESEARCH ENGINE TEST SET UP รุ่น 240PE.....88
3.15	เครื่องมือวัดมลพิษไอเสีย .....89
3.16	ภาพตารางข้อมูลการเซ็ทอัพเครื่องยนต์ .....90
4.1	Gas chromatograph profiles ของน้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม (POB100).....96
4.2	Gas chromatograph profiles ของน้ำมันไบโอดีเซลรำข้าว (RBB100).....97
4.3	Gas chromatograph profiles ของน้ำมันไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) .....98
4.4	ค่าความหนืดจลศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ .....104
4.5	ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ .....105
4.6	อุณหภูมิการกลั่นที่ 50% ของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ .....107
4.7	ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ .....108
4.8	ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ.....109
4.9	ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยง .....112
4.10	อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยง .....113
4.11	การเปลี่ยนแปลงของความล่าช้าในการจุดระเบิดต่อการปรับอัตราส่วนการอัด ของ (a) เชื้อเพลิง 10 ชนิด (b) เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล (B100) (c) เชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B40) (d) เชื้อเพลิงดีเซล และน้ำมันดีเซลผสม (B20) .....116

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ .....	119
4.13 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่าง น้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ที่อัตราส่วนการอัด 18 ที่โหลดต่าง ๆ.....	120
4.14 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล (B40) ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ .....	123
4.15 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างดีเซล และน้ำมันดีเซลผสม (B40) ที่อัตราส่วนการอัด 18 ในโหลดต่าง ๆ .....	124
4.16 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลผสม (B20) ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17, 18 .....	127
4.17 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่าง น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B20) ของอัตราส่วนการอัด 18 ที่โหลดต่าง ๆ .....	128
4.18 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนในแต่ละ องศาเพลาช้อเหวี่ยงของเชื้อเพลิงดีเซลเปรียบเทียบอัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ในโหลดต่าง ๆ.....	129
4.19 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับโหลดของเชื้อเพลิงทั้ง 10 ชนิด ที่อัตราส่วน การอัดต่าง ๆ .....	130
4.20 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ .....	131
4.21 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	131
4.22 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	132
4.23 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับอัตราส่วนการอัดที่ได้จากการคำนวณ .....	133
4.24 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับอัตราส่วนการอัดที่ได้จากการทดสอบ เครื่องยนต์ .....	133

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับโหลด ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ .....	142
4.26 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลด ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	143
4.27 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ .....	144
4.28 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	144
4.29 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	145
4.30 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	145
4.31 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	146
4.32 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	146
4.33 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	156
4.34 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	157
4.35 การปล่อยไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	158
4.36 การปล่อยควัน (Smoke Opacity) ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ.....	159
4.37 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) กับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18.....	160
4.38 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) กับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100, RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18.....	160

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) กับ โหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 .....	161
4.40 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับ โหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 .....	161
4.41 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับ โหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18.....	162
4.42 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับ โหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 .....	162
4.43 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) กับ โหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18.....	163
4.44 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) กับ โหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18.....	163
4.45 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) กับ โหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 .....	164
4.46 การปล่อยควัน (Smoke Opacity) กับ โหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18.....	164
4.47 การปล่อยควัน (Smoke Opacity) กับ โหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18.....	165
4.48 การปล่อยควัน (Smoke Opacity) กับ โหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 .....	165

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	คือ มาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา
BMEP	คือ ความดันขั้วผลเฉลี่ยเบรก
BSFC	คือ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก
BTE	คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก
CA	คือ องศาเพลาค้อเหวี่ยง
CCI	คือ คัทซีเทน
CO	คือ คาร์บอนมอนอกไซด์
COB20	คือ ดีเซลผสมไบโอดีเซลมะพร้าวที่ 20 %Vol
COB40	คือ ดีเซลผสมไบโอดีเซลมะพร้าวที่ 40 %Vol
COB100	คือ ไบโอดีเซลมะพร้าวที่ 100%
EA	คือ พลังงานกระตุ้นปรากฏ
G	คือ ความถี่เอพีไอ
$h_{fg}$	คือ เอนทัลปีของการกลายเป็นไอ
HC	คือ ไฮโดรคาร์บอน
HHV	คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง
ID	คือ ความล่าช้าในการจุดระเบิด
LHV	คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ
M	คือ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของการเดือดที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร
$m_f$	คือ อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง
$MW_{FAME}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันเมทิลเอสเทอร์
$MW_{crude\ oil}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันพืชดิบ
N	คือ รอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยง
$n_R$	คือ วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์
$NO_x$	คือ ออกไซด์ของไนโตรเจน
$P_b$	คือ กำลังเบรก

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P	คือ ความดันในห้องเผาไหม้
PM	คือ ฝุ่นละออง
POB20	คือ ดีเซลผสมไบโอดีเซลปาล์มที่ 20 %Vol
POB40	คือ ดีเซลผสมไบโอดีเซลปาล์มที่ 40 %Vol
POB100	คือ ไบโอดีเซลปาล์ม 100 %
$Q_{HV}$	คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง
ROHR	คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน
RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์
RBB20	คือ ดีเซลผสมไบโอดีเซลรำข้าวที่ 20 %Vol
RBB40	คือ ดีเซลผสมไบโอดีเซลรำข้าวที่ 40 %Vol
RBB100	คือ ไบโอดีเซลรำข้าว 100 %
T	คือ แรงบิด
$V_c$	คือ ปริมาณห้องเผาไหม้เผาไหม้
$V_d$	คือ ปริมาตรกระบอกสูบไม่รวมปริมาตรห้องเผาไหม้
VBDC	คือ ปริมาตรที่จุดศูนย์ตายล่าง
VTDC	คือ ปริมาตรที่จุดศูนย์ตายบน
$Y_{th}$	คือ ผลตอบแทนทางทฤษฎีของไบโอดีเซล
$Y_{act}$	คือ ผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจริง

# บทที่ 1

## บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้และลักษณะการปล่อยไอเสียของน้ำมันไบโอดีเซลจากพืช 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม มะพร้าว ราชำว และไบโอดีเซลผสม โดยมีสัดส่วนผสม 20:80 และ 40:60 ระหว่างไบโอดีเซลกับดีเซล โดยนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีการปรับอัตราส่วนการอัด โดยบทนำในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และสถานที่ดำเนินงานวิจัย

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล (Compression Ignition Engine) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากเป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดน้ำมัน มีแรงบิดสูงในรอบต่ำ มีความทนทาน และสามารถใช้งานในการบรรทุกได้ดีกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (Spark Ignition Engine) เครื่องยนต์ดีเซล (CI) นั้นถูกออกแบบมาให้สามารถรับแรงอัดระเบิดได้รุนแรงกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (SI) การจุดระเบิดให้สภาวะความดันสูงกว่า ส่งผลให้เครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงเครื่องยนต์ดีเซล (CI) จึงถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์จำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นรถบรรทุกขนส่งสินค้า รถแทรกเตอร์ เครื่องยนต์ทำการเกษตร และเรือประมง ความต้องการใช้เชื้อเพลิงดีเซลจึงมากขึ้นไปด้วย แต่เครื่องยนต์ดีเซลมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีการปลดปล่อยปริมาณ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ซัลเฟอร์ของออกไซด์ (SO<sub>x</sub>), ไนโตรเจนของออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และควัน (Smoke) จำนวนมากจากไอเสียการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (D. Agrawal et al., 2007) และจากงานหลายวิจัยที่ผ่านมามีพบว่า ไบโอดีเซลสามารถผสมในน้ำมันดีเซลเพื่อให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลผสมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นพิษน้อยกว่าน้ำมันดีเซลธรรมดา (D.H. Qi et al., 2010), (Agarwal Deepak et al., 2006), (Kumar Agarwal Avinash., 2007) และเมื่อผสมกับดีเซลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์ (Shahid Ejaz M et al., 2008), (Demirbas Ayhan., 2008), (Demirbas Ayhan., 2009)

อีกทั้งเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมีความผันผวนของราคาน้ำมันเชื้อเพลิง การปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นราคาน้ำมันส่งผลโดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรมและการเกษตร การนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบประมาณ 99% ถือเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งราคาต้นทุนคิดเป็น 70-95 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ซึ่งสำหรับประเทศไทยเรามีการนำน้ำมันบริสุทธิ์และน้ำมันใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซล และในไทยยังมีแหล่งวัตถุดิบแหล่งจากพืชชนิดต่าง ๆ เนื่องจากไทยมีการปลูกพืชที่มีน้ำมันอีกหลายชนิด เช่น ข้าว ที่มีการปลูกจำนวนมาก ซึ่งในปี 2561 มีผลิตทั้งหมด 34.6 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร 2561) โรงงานจะแปรรูปข้าวเปลือกและทำการติดตั้งโรงกลั่นน้ำมันรำข้าว สำหรับประเทศไทยเรามีการผลิตน้ำมันรำข้าวโดยรวมประมาณ 85 ล้านลิตรต่อปี (คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี) ปริมาณของรำข้าวที่ผลิต (ประมาณ 8% w/w ข้าวเปลือก) ซึ่งเป็นของเหลือจากการเกษตรมีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้มีความสนใจใช้น้ำมันรำข้าวมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลทดสอบด้วย และพืชมะพร้าวก็สามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ทั่วประเทศไทย คุณสมบัติของไบโอดีเซลมะพร้าวค่อนข้างมีเอกลักษณ์ มีกรดไขมันที่ประกอบด้วยจำนวนคาร์บอนต่ำ C8-C14 ในกรดไขมันมากกว่าร้อยละ 50 ของกรดไขมัน (P. Nakpong et al., 2010) ดังนั้นจึงมีความหนืดต่ำกว่าไบโอดีเซลปาล์มหรือน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้จุดเย็งต่ำซึ่งคาดว่าน้ำมันมะพร้าวจะเป็นไบโอดีเซลที่มีศักยภาพสำหรับไบโอดีเซลผสม จึงเป็นอีกหนึ่งในวัตถุดิบที่ดีสำหรับการผลิตไบโอดีเซล และขณะนี้ประเทศไทยมีปริมาณปาล์มน้ำมันสันตลาดส่งผลต่อราคาที่ตกต่ำปัญหาสต็อกน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ที่มีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น กนป. ระบุ ปี 2561 น้ำมันปาล์มดิบรวม 3.15 ล้านตัน ในขณะที่ความต้องการใช้ภายในประเทศอยู่ที่ 2.34 ล้านตัน สูงกว่าระดับสต็อกที่เหมาะสมอยู่ 560,000 ตัน (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร) เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับปาล์มน้ำมันและเพื่อรองรับปริมาณผลผลิตที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต รัฐบาลจึงได้มีการพัฒนาและส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลมาเป็นพลังงานทดแทน โดยการนำน้ำมันไบโอดีเซลมาผสมกับดีเซลตั้งแต่ปี พ.ศ.2548 ซึ่งที่ผ่านมาไบโอดีเซลสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเติมแทนปิโตรเลียมดีเซลในสัดส่วนต่างๆ ได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ดีเซล ไม่ว่าจะเป็นช่วงระยะสั้นหรือระยะยาวไบโอดีเซลนับเป็นอีกหนึ่งผลงานที่ช่วยให้อนาคตพลังงานของไทยสดใสขึ้น และไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากน้ำมันภายในประเทศซึ่งจะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศได้ รวมทั้งยังช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิล ช่วยรักษาเสถียรภาพของสินค้าทางการเกษตร และยังช่วยรักษาสีแก๊วดีเซล เพราะไบโอดีเซลสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพและในการทดลองมีการปรับอัตราส่วนการอัดเนื่องจากมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและการปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงและได้มีเทคโนโลยีใหม่ ๆ



มาพัฒนา จึงจำเป็นต้องมีศึกษาการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การออกแบบเครื่องยนต์ที่มีผลต่อเชื้อเพลิงแต่ละแบบอย่างเหมาะสม (P.K. Sahoo et al., 2009), (M.A. Kalam et al., 2003) ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจทำการศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม มะพร้าว รำข้าว โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และการวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงต่าง ๆ ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด ความหนาแน่น การกลั่น ดัชนีซีเทน และค่าความร้อนเชื้อเพลิง รวมทั้งความบริสุทธิ์ เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลในกรณีต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาในข้างต้น และการศึกษาผลจากการนำน้ำมันไบโอดีเซลจากพืชทั้ง 3 ชนิด มาผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 20%, 40% เรียกว่า “B20” และ “B40” ตามลำดับ ตลอดจนทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับค่าอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าว ที่มีต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งจากงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงความเหมาะสมและประสิทธิภาพของน้ำมันแต่ละชนิดมากยิ่งขึ้น เป็นการส่งเสริมการใช้ น้ำมันพืชจากเกษตรกรสามารถผลิตเองได้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตร เพื่อลดการใช้น้ำมันดีเซลจากการนำเข้าจากต่างประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันรำข้าว โดยใช้กระบวนการ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Trans-esterification)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคูณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลแต่ละชนิด จากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการปรับอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีผลต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษ กับน้ำมันไบโอดีเซล จากพืช 3 ชนิด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาคูณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลผสมจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราส่วน 20% และ 40% โดยปริมาตร
- 1.2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการปรับอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษไอเสีย จากการนำน้ำมันไบโอดีเซลผสมจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราส่วน 20% และ 40% โดยปริมาตร

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ใช้น้ำมันจาก น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันรำข้าว และใช้เมทิลแอลกอฮอล์ (เมทานอล) เป็นสารตั้งต้น โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

1.3.2 ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันรำข้าว โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Trans-esterification) ในรูปแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ 3 ชนิด ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น ความหนืด การกลั่น ดัชนีซีเทน และค่าความร้อนเชื้อเพลิง รวมถึงความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล

1.3.4 ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ค่าอัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (BTE) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (BSFC) การล่าช้าของการจุดระเบิด (Delay Period หรือ Ignition Delay) ของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด และน้ำมันไบโอดีเซลผสม 6 ชนิด โดยทดสอบสมรรถนะกำลังโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสไฟฟ้า (Eddy Current Brake) ระบายความร้อนด้วยน้ำ ในการวัดแรงบิดแบบโหลดเซลล์ (Load Cell) ที่ภาระโหลด 3, 6, 9 และ 12 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 25%, 50%, 75% และ 100% ของกำลังเครื่องยนต์ที่สามารถผลิตได้

1.3.5 ทดสอบเปรียบเทียบการปรับค่าอัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ที่ส่งผลต่อการปล่อยมลพิษไอเสีย ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide,  $\text{NO}_x$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO) ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) และควันดำ (Smoke Opacity) จาก น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด และน้ำมันไบโอดีเซลผสมอีก 6 ชนิด ที่ภาระโหลด 3, 6, 9 และ 12 กิโลกรัมหรือเท่ากับ 25%, 50%, 75% และ 100% ของกำลังเครื่องยนต์ที่สามารถผลิตได้

1.3.6 ในการทดสอบใช้เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ โดยเป็นเครื่องยนต์ RESEARCH ENGINE TEST SET UP 1 ระบายออกสู่อากาศ โดยเครื่องยนต์มีปรับอัตราส่วนการอัด 16:1, 17:1 และ 18:1 ซึ่งมีกำลังสูงสุด 3.5 กิโลวัตต์ที่ 1,500 รอบต่อนาที

1.3.7 ทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที และองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง 24 องศา ก่อนจุดศูนย์ตายบน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Trans-esterification)

1.4.2 ทราบถึงความแตกต่างของคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากพืช 3 ชนิด และน้ำมันเชื้อเพลิงผสมทั้ง 6 ชนิด เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลมาตรฐาน

1.4.3 ทราบถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ปรับค่าอัตราส่วนต่าง ๆ จากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากพืชทั้ง 3 ชนิด และน้ำมันเชื้อเพลิงผสมทั้ง 6 ชนิด เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลมาตรฐาน

1.4.4 ทราบถึงผลจากการปลดปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ปรับค่าอัตราส่วนการอัดต่าง ๆ จากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากพืชทั้ง 3 ชนิด และน้ำมันเชื้อเพลิงผสมทั้ง 6 ชนิด เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลมาตรฐาน

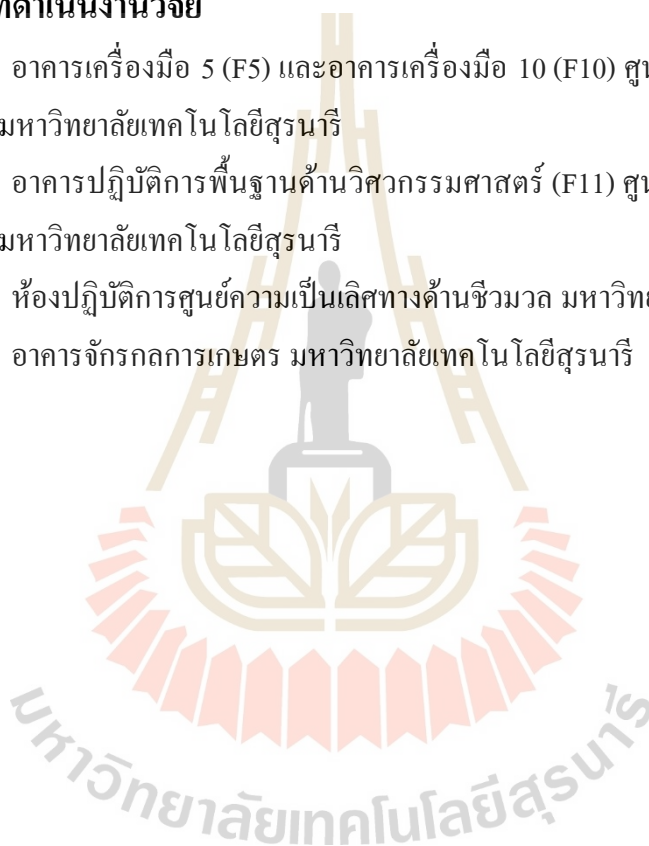
## 1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือ 5 (F5) และอาคารเครื่องมือ 10 (F10) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.3 ห้องปฏิบัติการศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.4 อาคารจักรกลการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลคือน้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม มะพร้าว และรำข้าว ที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชัน (Trans-esterification) การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐาน American Society of Testing and Materials (ASTM) การศึกษาสมรรถนะและผลการปล่อยมลพิษไอเสีย ลักษณะการเผาไหม้ และได้ศึกษาผลการทดสอบเปรียบเทียบการปรับค่าอัตราส่วนอัด (Compression Ratio) จากเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยการจุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition Engine) โดยรายละเอียดต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

#### 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

##### 2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, SG)

ความถ่วงจำเพาะ คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของสารหนึ่งต่อความหนาแน่นของสารมาตรฐานที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน เป็นปริมาณที่ไร้มิติ (Dimensionless) พร้อมระบุอุณหภูมิที่ทดสอบ สำหรับของเหลวสารมาตรฐานคือน้ำ สารที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 1 จะจมน้ำ สารที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1 ลอยน้ำได้ ซึ่งเป็นข้อกำหนดสมบัติของแก๊สและน้ำมันเชื้อเพลิง โดยมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมี และพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ ความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลกำหนดในช่วง 0.86-0.90 ที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ตามวิธีการทดสอบ ASTM D1298

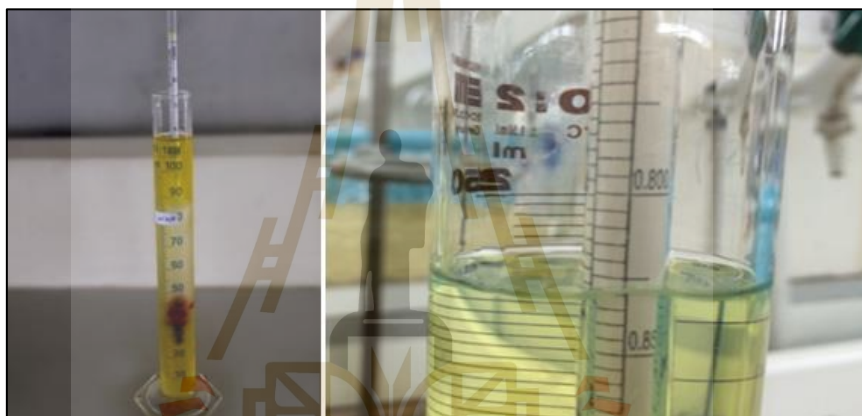
$$SG = \frac{\rho_{\text{substance}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\rho_{\text{substance}}$  คือ ความหนาแน่นของสาร ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 15.6 °C ( $\text{kg/m}^3$ )

จากค่าที่อ่านได้ในข้อปฏิบัติข้างต้นนั้นสามารถนำมาคำนวณเป็นมาตรฐานความถ่วงเอพียู (API Gravity) โดยเทียบเท่าความถ่วงจำเพาะ โดยมาตรฐานความถ่วงเอพียูถูกจัดตั้งขึ้นโดยสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (America Petroleum Institute, API) ซึ่งหน่วยความถ่วงเอพียูมีความละเอียดกว่าความถ่วงจำเพาะและไม่ต้องอ่านตัวเลขหลังจุดทศนิยมหลายตำแหน่ง สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ 2.2

$$\text{ความถ่วงเอพียู (API Gravity)} = \frac{141.5}{\text{ความถ่วงจำเพาะ } 15.6/15.6 \text{ } ^\circ\text{C}} - 131.5 \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 การวัดค่าความถ่วงจำเพาะด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)

### 2.1.2 ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity)

ความหนืดเชิงจลศาสตร์ คือ ความต้านทานต่อการไหลของของเหลวที่วัดภายใต้แรงโน้มถ่วงที่อุณหภูมิมาตรฐาน เป็นอัตราส่วนของความหนืดไดนามิกส์ (Dynamic Viscosity) ต่อความหนาแน่นของของเหลว หน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) หรือสโตก (Stoke) มีผลต่อรูปร่างของละอองน้ำมันที่ฉีดจากหัวฉีด น้ำมันที่มีความหนืดคิเนแมติกสูงจะฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นฝอยไม่ดีและได้ละอองน้ำมันขนาดใหญ่ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดคิเนแมติกต่ำเกินไปละอองน้ำมันละเอียดมาก แต่ไม่พุ่งไปไกลเท่าที่ควร ซึ่งมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลได้กำหนดความหนืดคิเนแมติกในช่วง 3.2-5.0 เซนติสโตก (cSt) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามวิธีการทดสอบ ASTM D445



รูปที่ 2.2 เครื่องมือ Viscosity-Kinematic Capillary Tempering Bath High Temperature

### 2.1.3 การกลั่น (Distillation)

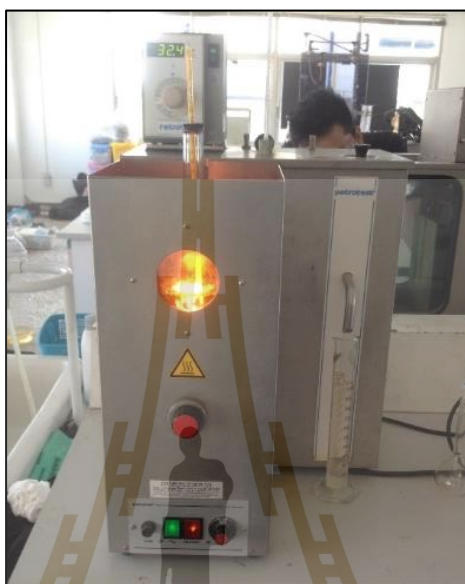
การวัดการกลั่นนั้นจะวัดภายใต้มาตรฐานของ American Society of Testing and Materials แต่จะเป็นมาตรฐานของการวัดการกลั่นคือ ASTM D86 ซึ่งเป็นการวัดอุณหภูมิของการกลั่นของน้ำมันตัวอย่างที่ 50% ของปริมาณน้ำมันตัวอย่าง โดยใช้น้ำมันตัวอย่างในการทดสอบที่ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่น้ำมันตัวอย่างเริ่มกลั่นตัว ในการทดสอบจะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบคือ อัตราการไหลของน้ำมันที่กลั่นออกมาได้ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 4-5 มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันนั้น จะส่งผลต่าง ๆ ต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ ได้แก่

1) การกลั่นเริ่มต้น (Initial Boiling Point, IBP) และจุดเดือด 10% (10% Evaporated) เป็นส่วนเบาเรียกว่า “Front End” ที่ระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำเพื่อช่วยให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่ายในเวลาเช้าซึ่งมีอากาศเย็น

2) การกลั่น 50% เป็นส่วนกลางเรียกว่า “Mid Fill” หรือ “Mid-Range” เป็นส่วนที่ระเหยได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อให้เครื่องยนต์ร้อนขึ้น (Warm Up) ได้เร็ว มีการกระจายตัวของน้ำมันไปยังสูบต่าง ๆ ได้สม่ำเสมอจนช่วยให้แรงเครื่องได้เรียบ

3) การกลั่น 90% เป็นส่วนหนักเรียกว่า “Back End” เป็นส่วนที่ให้พลังงานกับเครื่องยนต์และการประหยัดเชื้อเพลิง ถ้าส่วนนี้มีอุณหภูมิต่ำเกินไปน้ำมันจะระเหยไม่หมดและไหลผ่านแหวนลูกสูบลงไปทำให้น้ำมันเครื่องเจือจางลง (Crankcase Dilution) และเสื่อมคุณภาพเร็ว

4) การกลั่นสุดท้าย (Final Boiling Point, FBP) ส่วนนี้แสดงว่ามีส่วนหนักมากอยู่เล็กน้อยแค่ไหน ถ้าจุดเดือดสุดท้ายและจุดเดือด 90% แตกต่างกันเกิน 30 °C อาจเกิดปัญหา ด้านความสะอาดในห้องเผาไหม้และร่องแหวนลูกสูบได้



รูปที่ 2.3 เครื่องมือ Distillation at Atmospheric Pressure

#### 2.1.4 ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

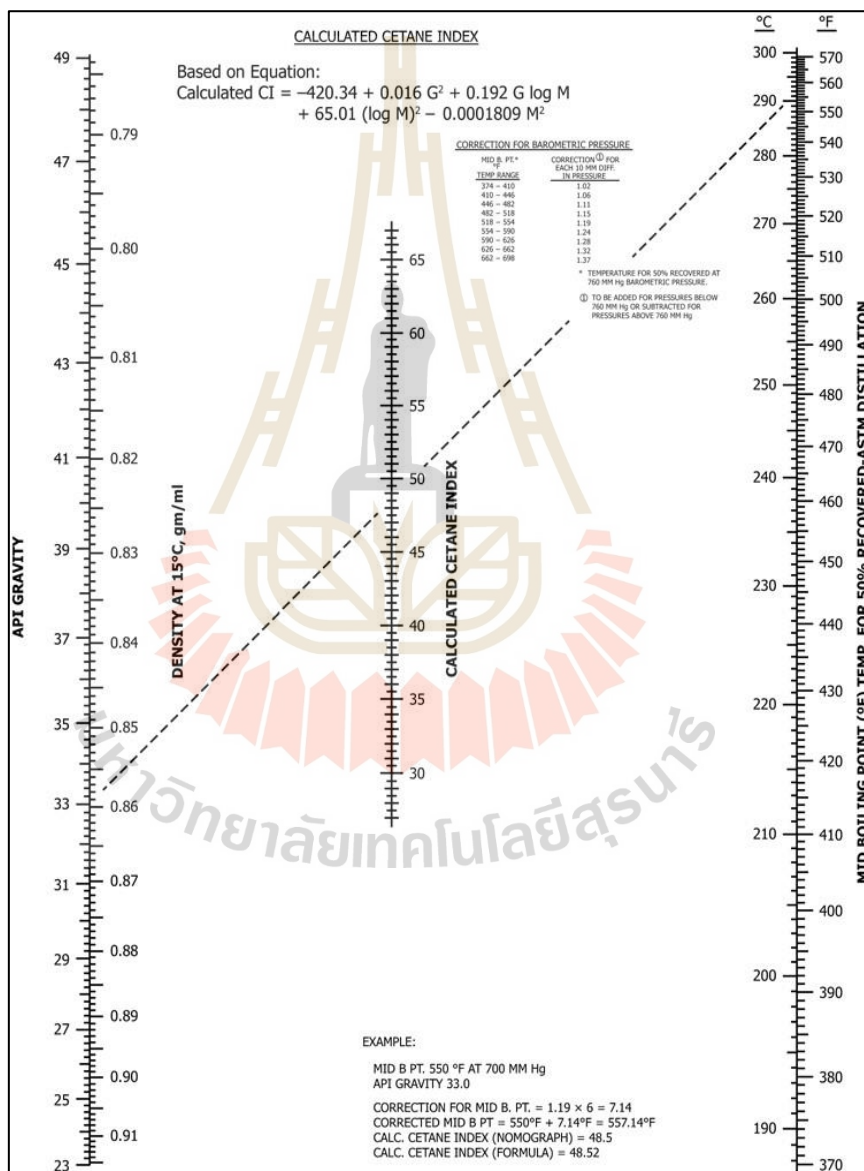
ดัชนีซีเทน คือ ค่าที่บ่งบอกคุณภาพการจุดติดไฟ (Ignition Quality) หรือการหน่วงติดไฟ (Ignition Delay) ของน้ำมันดีเซล เมื่อน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้จนเกิดติดไฟได้เอง น้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนสูงมีองค์ประกอบพาราฟินโซตรงมากปริมาณสารแอมโรแมติกต่ำ จุดติดไฟเร็ว เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่าย เครื่องยนต์เดินเรียบ ไอเสียไม่เกิดควันขาว กำหนดได้จากความถ่วงจำเพาะ API และจุดเดือดค่ากลาง (Mid-Boiling Point) ของน้ำมันตามวิธีมาตรฐาน ASTM D976 หรือ D4737 น้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่กำหนดในท้องตลาดต้องมีดัชนีซีเทนไม่ต่ำกว่า 47 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลกำหนดดัชนีซีเทนไม่ต่ำกว่า 51 โดยดัชนีซีเทนได้มาจากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร หรือจุดกึ่งกลางของการเดือด (Mid Boiling Point) และความหนาแน่นหรือความถ่วงเอพีไอที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าดัชนีซีเทนสามารถหาได้จากโนโมกราฟ ดังรูปที่ 2.4 หรือคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$CCI = -420.34 + 0.016G^2 + 0.192G \log M + 65.01(M)^2 \tag{2.3}$$

โดย CCI คือ คัดซีซีเทน (Calculated Cetane Index)

G คือ ความถ่วงเอพีไอ (API Gravity)

M คือ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของการเดือดที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร มีหน่วยเป็น °F



รูปที่ 2.4 โนโมกราฟ (Nomograph) สำหรับการหาค่าดัชนีซีเทน



### 2.1.5 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้น ๆ 1 หน่วยมวล (สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว) หรือ 1 หน่วยปริมาตร (สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ) เมื่อเผาไหม้หมดอย่างสมบูรณ์ สำหรับการเปรียบเทียบว่าเชื้อเพลิงชนิดใดจะให้พลังงานความร้อนได้มากกว่ากันสามารถทำได้โดยนำน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมาต้มน้ำในปริมาตรเท่ากัน ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากัน เชื้อเพลิงชนิดใดใช้หมดไปน้อยที่สุด เชื้อเพลิงนั้นจะมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงมากคือเป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนได้ดี ในการเลือกใช้ประเภทของเชื้อเพลิง นอกจากจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการให้พลังงานความร้อนสูงแล้ว ยังต้องพิจารณาความเหมาะสมอื่น ๆ อีก เช่น ราคาเชื้อเพลิง ความปลอดภัยในการใช้ ปริมาณการผลิต ปริมาณเชื้อเพลิงที่มีในธรรมชาติ ตลอดจนประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้กับเชื้อเพลิงนั้น ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วอุปกรณ์หรือเครื่องยนต์ต่าง ๆ จะมีประสิทธิภาพในการทำงานไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์เสมอ เช่น สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม และบางส่วนสูญเสียไปเพื่อเอาชนะความฝืดของเครื่องยนต์ เพื่อให้ได้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ถูกต้อง เชื้อถือได้ จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “บอมบ์แคลอริมิเตอร์” (Bomb Calorimeter) ซึ่งเครื่องมือนี้จะป้องกันไม่ทำให้ปริมาณความร้อนบางส่วนต้องสูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม ตามมาตรฐาน ASTM D240



รูปที่ 2.5 เครื่องมือ Bomb Calorimeter รุ่น Bomb C5000

### 2.1.6 ความบริสุทธิ์ (Purity)

การทดสอบความบริสุทธิ์ของน้ำมันจะใช้เครื่องมือเรียกว่า “โครมาโทกราฟี” (Chromatography) ดังรูปที่ 2.6 ในการทดสอบตามมาตรฐาน EN 14103 โครมาโทกราฟีอาศัย

สมบัติ 2 ประการคือ สารต่างชนิดกันมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้ต่างกัน และสารต่างชนิดกันมีความสามารถในการถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ต่างกัน โครมาโทกราฟี (Chromatography) เป็นการแยกสารผสมที่มีสี หรือสารที่สามารถทำให้เกิดสีได้ วิธีการนี้จะมีเฟส 2 เฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (Stationary Phase) กับเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) โดยที่สารในเฟสอยู่กับที่ จะทำหน้าที่ดูดซับ (Adsorb) สารผสมด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ สารที่ใช้ทำเฟสอยู่กับที่จึงมีลักษณะ เป็นผงละเอียดมีพื้นที่ผิวมากเช่นอลูมินา (Alumina,  $Al_2O_3$ ) ซิลิกาเจล (Silica Gel,  $SiO_2$ ) หรืออาจจะ ใช้วัสดุที่สามารถดูดซับได้ดี เช่น ซอล์ก กระดาษ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 เครื่องมือโครมาโทกราฟี (Chromatography)

ซึ่งสารที่ทำหน้าที่ดูดซับในเฟสอยู่กับที่ เช่น น้ำ ส่วนเฟสเคลื่อนที่ จะทำหน้าที่ชะ (Elute) เอาสารผสมออกจากเฟสอยู่กับที่ให้เคลื่อนที่ไปด้วย การจะเคลื่อนที่ได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างสารในสารผสมกับตัวดูดซับในเฟสอยู่กับที่ ดังนั้นสารที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่จึง ได้แก่ พวกตัวทำละลาย เช่น ปิโตรเลียมอีเทอร์ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม เบนซีน ฯลฯ การทำโครมาโทกราฟีสามารถทำได้หลายวิธีจะแตกต่างกันที่เฟสอยู่กับที่ว่า อยู่ในลักษณะใด เช่น

1) โครมาโทกราฟีแบบคอลัมน์ (Column Chromatography) ทำได้โดยการบรรจุ สารที่เป็นเฟสอยู่กับที่ เช่น อลูมินาหรือซิลิกาเจลไว้ในคอลัมน์ แล้วเทสารผสมที่เป็นสารละลาย ของเหลวลงสู่คอลัมน์ สารผสมจะผ่านคอลัมน์ช้า ๆ โดยตัวทำละลายซึ่งเป็นเฟสเคลื่อนที่เป็นผู้ พาไป สารในเฟสอยู่กับที่ จะดูดซับสารในสารผสมไว้ส่วนประกอบใดของสารผสมที่ถูกดูดซับได้ดี จะเคลื่อนที่ช้า ส่วนที่ถูกดูดซับไม่ดีจะเคลื่อนที่ได้เร็วทำให้สารผสมแยกจากกันได้

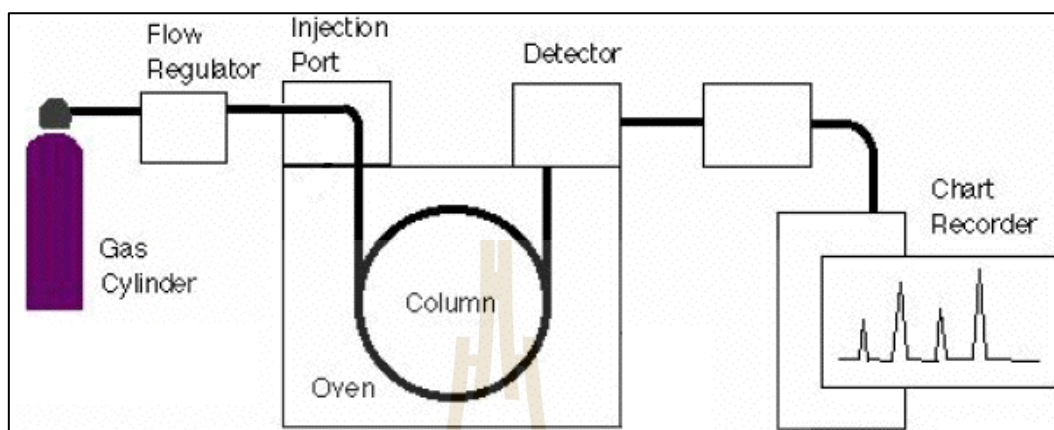
2) โครมาโทกราฟีแบบชั้นบาง (Thin Layer Chromatography) เป็นโครมาโทกราฟีแบบระนาบ (Plane Chromatography) โดยทำเฟสอยู่กับที่ให้มีลักษณะเป็นคริมชั้น แล้วเคลือบบนแผ่นกระจกให้ความหนาของการเคลือบเท่ากันตลอดแล้วนำไปอบให้แห้ง หยดสารละลายของสารผสมที่ต้องการแยกบนแผ่นที่เคลือบเฟสอยู่กับที่นี้ไว้ แล้วนำไปจุ่มในภาชนะที่บรรจุตัวทำละลายที่เป็นเฟสเคลื่อนที่ไว้ โดยให้ระดับของตัวทำละลายต้องอยู่ต่ำกว่าระดับของจุดที่หยดสารผสมไว้ตัวทำละลายจะซึมไปตามเฟสอยู่กับที่ด้วยการซึมตามรูเล็กเหมือนกับน้ำที่ซึมไปในกระดาษหรือผ้า เมื่อซึมถึงจุดที่หยดสารผสมไว้ ตัวทำละลายจะชะเอาองค์ประกอบในสารผสมนั้นไปด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพมีขั้ว (Polarity) ของสารที่เป็นองค์ประกอบกับสารที่เป็นตัวทำละลาย ถ้าตัวทำละลายเป็น โมเลกุลมีขั้ว (Polar Molecules) จะชะเอาสารในสารผสมที่เป็นสารมีขั้วไปด้วยได้เร็ว ส่วนสารที่ไม่มีขั้วในสารผสมจะถูกชะพาไปได้ช้าสารผสมก็จะแยกออกจากกัน

3) โครมาโทกราฟีแบบกระดาษ (Paper Chromatography) เป็นโครมาโทกราฟีแบบระนาบอีกแบบหนึ่ง มีวิธีการและหลักการเหมือนกับโครมาโทกราฟีแบบชั้นบาง แตกต่างกันที่เฟสอยู่กับที่ใช้กระดาษที่สามารถดูดซับได้แทนกระจกที่เคลือบด้วยซิลิกาเจล

4) โครมาโทกราฟีแบบแก๊ส (Gas Chromatography, GC) ใช้สำหรับแยกสารผสมที่เป็นแก๊ส โดยมีเฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สเช่นกันแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารผสม เช่น ฮีเลียม จะทำหน้าที่เป็นตัวพา (Carrier) สารผสม ส่วนเฟสอยู่กับที่อาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ เมื่อทั้งตัวพาและสารผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นี้ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จะดึงดูดด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ตามความเป็นขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน สารผสมก็จะแยกออกจากกัน

ปัจจุบันเทคโนโลยีของโครมาโทกราฟีได้ถูกพัฒนาให้สามารถทำงานได้รวดเร็วและใช้แยกสารตัวอย่างได้ครั้งละหลายสารตัวอย่าง เช่น Gas - Liquid Chromatography (GLC), High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เป็นต้น หลักการของโครมาโทกราฟี คือโครมาโทกราฟีอาศัยหลักการละลายของสารในตัวทำละลาย และการดูดซับโดยตัวดูดซับ โดยสารที่ต้องการนำมาแยกโดยวิธีนี้จะมีสมบัติการละลายในตัวทำละลายได้ไม่เท่ากัน และตัวดูดซับโดยตัวดูดซับได้ไม่เท่ากัน ทำให้สารเคลื่อนที่ได้ไม่เท่ากัน วิธีการทำโครมาโทกราฟี คือนำสารที่ต้องการแยกมาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วให้เคลื่อนที่ไปบนตัวดูดซับ การเคลื่อนที่ของสารบนตัวดูดซับขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสารแต่ละชนิดในตัวทำละลาย และความสามารถในการดูดซับที่มีต่อสารนั้น กล่าวคือสารที่ละลายในตัวทำละลายได้ดี

และถูกดูดซับน้อยจะถูกเคลื่อนที่ออกมาก่อน ส่วนสารที่ละลายได้น้อยและถูกดูดซับได้ดีจะเคลื่อนที่ออกมาทีหลัง ถ้าใช้ตัวดูดซับมาก ๆ จะสามารถแยกสารออกจากกันได้ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของเครื่องโครมาโทกราฟี

## 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

การกำหนดคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยทั่วไปนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง และประเภทที่ 2 การทดสอบคุณลักษณะในการทำงานของน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ คุณลักษณะของน้ำมันที่สามารถทดสอบได้ โดยเครื่องมือที่อาศัยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์อย่างสมบูรณ์นั้นมีไม่กี่ชนิด เช่น ค่าปริมาณกำมะถันและค่าความหนืด ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องมือ นอกจากนั้นแล้ว ส่วนใหญ่จะเป็นค่าที่ถูกวัดขึ้นมาโดยใช้การทดสอบบางอย่างที่ใช้มาตรฐานเป็นตัวกำหนด เช่น การใช้มาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) หรือสถาบันปิโตรเลียม (IP) เป็นต้น ในส่วนของประเทศไทยนั้นกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล และของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ดังนี้

### 2.2.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซลตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูง-ต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ <sup>1</sup>
			หมุนเร็ว	หมุนช้า	
1	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 °C (Specific Gravity at 15.6/15.6 °C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	0.810  0.870	-  0.920	ASTM D1298
2	เลขซีเทน (Cetane Number) หรือ ดัชนีซีเทน (Calculate Cetane Index)	ไม่ต่ำกว่า  ไม่ต่ำกว่า	50  50	45  45	ASTM D613  ASTM D976
3	จุดไหลเท (องศาเซลเซียส) (Pour Point, °C)	ไม่สูงกว่า	10	16	ASTM D97
4	กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.005	1.5	ASTM D2622
5	ความหนืด (เซนติสโตกส์) (Viscosity, cSt) 3.1 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (at 40 °C) หรือ 3.2 ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (at 50 °C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า  ไม่สูงกว่า	1.8  4.1  -	-  8.0  6.0	ASTM D445
6	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	-	ASTM D130
7	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กรัม/ลูกบาศก์เมตร) (Oxidation Stability, g/m <sup>3</sup> )	ไม่สูงกว่า	25	-	ASTM D2274
8	กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Carbon Residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.05	-	ASTM D189
9	น้ำและตะกอน (ร้อยละโดยปริมาตร) (Water and Residue, %vol)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.3	ASTM D2709

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556) (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา สูง-ต่ำ	น้ำมันดีเซล		วิธีทดสอบ <sup>1</sup>
			หมุนเร็ว	หมุนช้า	
10	เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.01	0.02	ASTM D482
11	จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส) (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	52	52	ASTM D 93
12	การกลั่น (องศาเซลเซียส) (Distillation, °C) อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตร ในอัตราร้อยละ 90 (90% recovered)	ไม่สูงกว่า	357	-	ASTM D86
13	โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, %wt.)	ไม่สูงกว่า	11	-	ASTM D2425
14	สี (Color) 14.1 ชนิดของสี (Hue) 14.2 ความเข้มของสี (Intensity)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	เหลือง - 4.0	น้ำตาล 4.5 7.5	ASTM D1500
15	ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของ กรดไขมัน (ร้อยละโดยปริมาตร) (Methyl Ester of Fatty Acids, %vol.)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5 7	- -	EN 14078
16	คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีดข่วน (ไมโครเมตร) (Lubricity, Wear Scar, µm)	ไม่สูงกว่า	460	-	CEC F-16-96
17	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives)	ให้เป็นไปตามความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

## 2.2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน

กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดลักษณะและคุณภาพน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันจำนวน 26 รายการ ดังตารางที่ 2.2 ตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) และมาตรฐานยุโรป (EN) ซึ่งมีการแก้ไขปรับปรุงเพื่อส่งเสริมให้มีการใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลหมุนเร็วในสัดส่วนที่สูงขึ้น โดยประกาศให้ยกเลิกประกาศข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2552 และมีผลบังคับใช้ฉบับล่าสุดตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2557 เป็นต้นไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูง-ต่ำ		วิธีทดสอบ <sup>1</sup>
1	เมทิลเอสเตอร์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) (Methyl Ester, %wt.)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) (Density at 15 °C, kg/m <sup>3</sup> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (เซนติสโตกส์) (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D445
4	จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส) (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D93
5	กำมะถัน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) จากร้อยละ 10 ของส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Carbon Residue, %wt.) On 10% Distillation Residue	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4560
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D613

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์  
ของกรดไขมัน (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูง-ต่ำ		วิธีทดสอบ <sup>1</sup>
8	เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Sulphated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D874
9	น้ำ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Water, mg/kg)	ไม่สูงกว่า	500	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Total Contamination, mg/kg)	ไม่สูงกว่า	24	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง) (Oxidation Stability at 110 °C, hr.)	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 15751
13	ค่าความปั่นกรด (มิลลิกรัมโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม) (Acid Value, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D664
14	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/100 กรัม) (Iodine Value, g Iodine/100 g)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลินolenic เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Linolenic Acid Methyl Ester, %wt.)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Methanol, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Monoglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.70	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Diglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Triglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Free glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105



ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูง-ต่ำ		วิธีทดสอบ <sup>1</sup>
21	กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Total glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (มีลิกรัม/กิโลกรัม) (Group I metals (Na + K), mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
	โลหะกลุ่ม 2 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (มีลิกรัม/กิโลกรัม) (Group II metals (Ca + Mg), mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
23	ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Phosphorus, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	EN 14107
24	จุดขุ่น (องศาเซลเซียส) (Cloud Point : CP, °C)	รายงาน <sup>2</sup>		
25	จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส) (Cold Flow Plugging Point : CP, °C)	รายงาน <sup>2</sup>		
26	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive, If Any)	ให้เป็นไปตามความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ

<sup>1</sup> วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นเทียบได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

<sup>2</sup> ให้ผู้ค้าน้ำมันรายงานอธิบดีเป็นรายไตรมาส ภายในวันที่ 15 ของเดือนถัดไป จากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

จากตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 เป็นข้อกำหนดลักษณะคุณภาพของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน สำหรับตรวจวัดคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถส่งผลกระทบต่อการใช้งานการขนส่งหรือแม้กระทั่งในด้านการค้า นอกจากนี้แล้วยังมีมาตรฐานอื่นๆ ที่ถูกกำหนดขึ้น เช่น มาตรฐานข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลในกลุ่มประเทศยุโรปที่ถูกกำหนดขึ้น เพื่อลดการปล่อยไอเสียที่เป็นมลพิษจาก

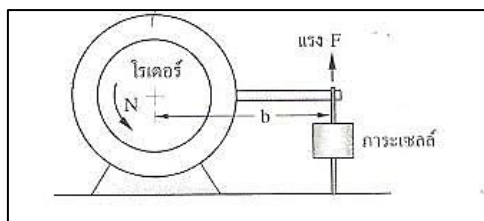
น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ประเภท เป็นการลดภาวะอากาศเสีย และเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดมาตรฐานตั้งแต่ EURO 1 จนถึง EURO 6 ซึ่งเน้นคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง เมื่อมีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ให้มีมลพิษไอเสียที่จะก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อมให้ลดลงเหลือน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น น้ำมันยูโร 4 (EURO 4) ได้กำหนดให้น้ำมันเบนซินและแก๊สโซฮอล์จะต้องมีสารโอเลฟินในน้ำมันไม่เกิน 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลดสารตะกั่วไม่สูงเกิน 0.005 กรัมต่อน้ำมัน 1 ลิตร กำมะถันไม่สูงเกิน 50 ppm ส่วนน้ำมันดีเซลกำหนดค่า PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) ไม่สูงเกิน 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กำมะถันไม่สูงเกิน 50 ppm และค่าซีเทนไม่ต่ำกว่า 50 เป็นต้น ทั้งนี้มาตรฐานยุโรปยังได้กำหนดปริมาณคุณภาพของไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ด้วย

### 2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซล ถือเป็นกลจักรความร้อนชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นพลังงานทางกล ซึ่งให้กำลังออกมาในรูปของแรงบิด เพื่อนำไปใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ โดยปกติแล้วการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์จะทำการทดสอบจากโรงงานผู้ผลิต แต่ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถทำการทดสอบเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้น พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์ที่ควรทราบ และทำความเข้าใจนั้นมีหลายปัจจัย ซึ่งจะกล่าวถึงดังนี้

#### 2.3.1 แรงบิด (Torque)

แรงบิด คือ โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นจากเพลลาข้อเหวี่ยง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “ไดนาโมมิเตอร์” ซึ่งมีอยู่หลายประเภท เช่น ไฮดรอลิกไดนาโมมิเตอร์ หรือไดนาโมมิเตอร์แบบไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อวัดค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 2.8 กระทำโดยการเร่งเครื่องยนต์พร้อมกับชุดต้านทานการหมุนให้ต้านทานหมุนของเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ และวัดขนาดของ แรงที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดแรง (Load Cell) สมการที่ใช้คำนวณแสดงดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.8 หลักการวัดแรงบิดด้วยไดนาโมมิเตอร์

$$T = Fb \quad (2.4)$$

โดย	T	คือ แรงบิด (N-m)
	F	คือ แรง (N)
	b	คือ ระยะจากจุดกึ่งกลางของแกนหมุนถึงแนวแรง (m)

### 2.3.2 กำลังเบรก (Brake Power)

กำลังเบรกเป็นกำลังที่วัดได้ที่เพลาค้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นกำลังที่นำไปใช้งาน การวัดกำลังเบรกจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ต่อเข้ากับเครื่องยนต์ เพื่อวัดแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถคำนวณกำลังเบรกได้จากสมการที่ 2.5

$$P_b = \frac{2\pi NT}{6000} \quad (2.5)$$

โดยที่	$P_b$	คือ กำลังเบรก (kW)
	T	คือ แรงบิด (N-m)
	N	คือ รอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยง (RPM)

### 2.3.3 ความดันยังผลเฉลี่ย

ความดันยังผลเฉลี่ย (Mean Effective Pressure: MEP) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่สภาวะเดียวกัน โดยไม่คำนึงถึงปริมาตรในกระบอกสูบหรือกล้าวอีกนัยหนึ่งคือ หากเปรียบเทียบเครื่องยนต์ที่มีปริมาตรกระบอกสูบหนึ่งหน่วยเท่ากัน เครื่องยนต์จะสามารถผลิตงานได้มากน้อยเพียงใด (ชัยยง ศิริพรมงคลชัย, 2558) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ แบบนำไอดีเข้าโดยธรรมชาติจะมีค่าความดันผลเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 700 ถึง 900 kPa (Willard W. Pullkrabek, 2003) หากพิจารณาจากกำลังเบรก เรียกว่า “ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (Brake Mean Effective Pressure: BMEP)” ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.6

$$BMEP = \frac{P_b n_R}{V_d N} \quad (2.6)$$

โดยที่ BMEP คือ ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (kPa)

$V_d$  คือ ปริมาตรกระบอกสูบ ( $m^3$ )

$n_R$  คือ จำนวนรอบการหมุนของเพลาคือเหวี่ยงที่ได้กำลัง 1 ครั้งต่อสูบ

#### 2.3.4 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption: SFC) คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวลต่อกำลังหนึ่งหน่วยที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ภายในระยะเวลาหนึ่งหน่วย (ชัยยง ศิริพรมงคผลชัย, 2558) โดยการทดสอบเครื่องยนต์ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะถูกวัดเป็นอัตราการไหลของมวล ซึ่งเครื่องยนต์ขนาดใหญ่จะมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก ดังนั้นการเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่มีขนาดแตกต่างกันในรูปแบบของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption: BSFC) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังเบรกที่ผลิตออกมา โดยคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.7

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (2.7)$$

โดยที่ BSFC คือ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (g/kW-hr)

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

#### 2.3.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency:  $\eta_{th}$ ) คือ ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล (ชัยยง ศิริพรมงคผลชัย, 2558) หรือ อัตราส่วนของงานที่ส่งออกต่อพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์ (N.K. Giri, 2011) ซึ่งเป็นส่วนที่มีสำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซล ทั้งนี้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถหาได้หลายกรณีบางครั้งหาได้จากกำลังบ่งซึ่งเรียกว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนบ่งชี้ (Indicated Thermal Efficiency:  $\eta_i$ ) หรือหาได้จากกำลังเบรกเรียกว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency :  $\eta_b$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$\eta_b = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\eta_b$  คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก  
 $Q_{HV}$  คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)

### 2.3.6 ความดันในกระบอกสูบ

ความดันในกระบอกสูบ (In - Cylinder Pressure) คือ ความดันที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบเทียบกับมุมมองเสาเพลลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ในช่วงจังหวะการอัดและจังหวะการคายของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ และเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของพลังงานเคมีในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยสามารถวัดได้ด้วยการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ความดัน เพื่อวัดความดันที่บริเวณห้องเผาไหม้

การวิเคราะห์ข้อมูลความดันกระบอกสูบข้อมูลความดันกระบอกสูบที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆตลอดช่วงจังหวะอัดและจังหวะขยายตัวสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในการหาอัตราการปลดปล่อยพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง (มันเรียกว่าอัตราการปลดปล่อยความร้อน) หรืออัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่ออธิบายลักษณะของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยวิธีการหาขั้นกระทำโดยการใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบเปิด เมื่อพิจารณาให้อยู่ในสถานะที่ความดันและอุณหภูมิสม่ำเสมอ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\frac{dQ}{dt} - P \frac{dv}{dt} + \sum_i \dot{m}_i h_i = \frac{dU}{dt} \quad (2.9)$$

โดย  $dQ/dt$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตของระบบเข้าไปในระบบ,  $Pdv/dt$  เป็นอัตราการไหลของมวลเข้าไปในระบบผ่านขอบเขตของระบบที่ตำแหน่ง  $i$  (การไหลออกจากระบบจะมีค่าเป็นลบ),  $h_i$  เป็นเอนทัลปีของมวล  $i$  ที่เข้าหรือออกจากระบบ และ  $U$  เป็นพลังงานของสารที่อยู่ภายในขอบเขตของระบบ

### 2.3.7 อัตราการปลดปล่อยความร้อน

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of Heat Release : ROHR) คือ อัตราที่พลังงานเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ของความดันในกระบอกสูบ และปริมาตรที่มุมมองเสาเพลลาข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ด้วย

กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สมมติฐานกระบวนการโพลีโทรปิก (Polytropic) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2.10

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (2.10)$$

โดยที่	Q	คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน
	$\gamma$	คือ อัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ ( $c_p/c_v$ )
	$\theta$	คือ องศาเพลลาข้อเหวี่ยง ( $^{\circ}\text{CA}$ )
	P	คือ ความดันในห้องเผาไหม้ (Bar)
	V	คือ ปริมาตรในห้องเผาไหม้ ( $\text{m}^3$ )

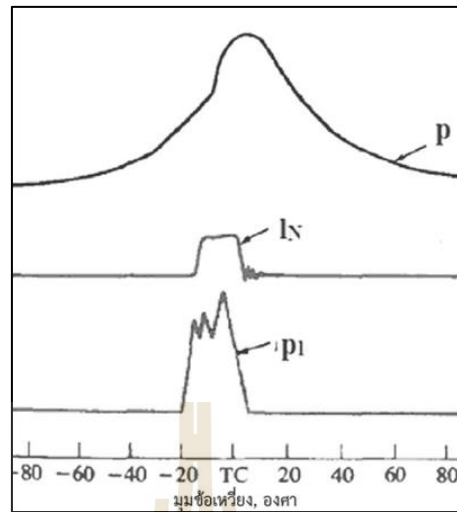
## 2.4 เกี่ยวกับเครื่องยนต์ดีเซลและอัตราส่วนการอัด

### 2.4.1 รูปแบบของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล

รูปแบบของกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถกำหนดและอธิบายได้จากการศึกษาภาพถ่ายของกระบวนการเผาไหม้และการวิเคราะห์ข้อมูลความดันกระบอกสูบในช่วงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat-release rate) ที่คำนวณมาจากข้อมูลความดันกระบอกสูบที่มุมข้อเหวี่ยงต่าง ๆ เป็นตัวกำหนดรูปแบบของการเผาไหม้ ซึ่งอัตราการปลดปล่อยความร้อนก็คือ อัตราที่ซึ่งพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงถูกปล่อยออกมาโดยกระบวนการเผาไหม้นั้นเอง (John B. Heywood, 1998)

#### 2.4.1.1 การเผาไหม้ในระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่ใช้หัวฉีดหลายรู

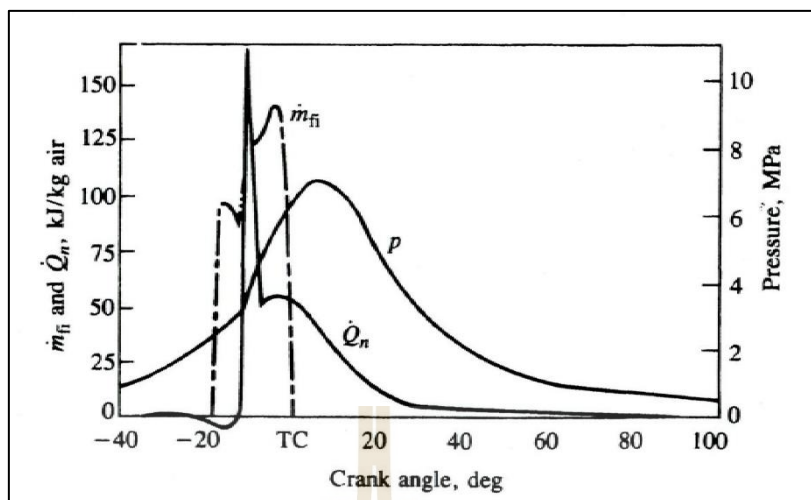
โดยรูปที่ 2.9 แสดงข้อมูลของความดันกระบอกสูบ ( $p$ ) ระยะยกของวาล์ว เข็มในหัวฉีด (Injector needle lift,  $I_N$ ) และความดันเชื้อเพลิงในท่อส่งเชื้อเพลิง ( $p_f$ ) ที่มุมข้อเหวี่ยงต่าง ๆ ตลอดจังหวะอัดและจังหวะขยายตัวของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น โดยอัตราการฉีดเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากความดันเชื้อเพลิงในท่อส่ง ความดันกระบอกสูบ ขนาดของรูหัวฉีด และระยะยกของวาล์วเข็มในหัวฉีด และดังรูปที่ 2.9 ดังกล่าวพบว่ามีช่วงล่าช้าระหว่างการเริ่มต้นของการฉีดเชื้อเพลิงกับการเริ่มต้นของการเผาไหม้ (จุดของการเปลี่ยนความชันของกราฟ  $P(\theta)$ ) เท่ากับ 9 องศา เมื่อมีการเผาไหม้แล้วความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่องศาของมุมข้อเหวี่ยง หลังจากนั้นจะเพิ่มอย่างช้า ๆ และจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณ  $5^{\circ}$  หลัง TC



รูปที่ 2.9 ความดันกระบอกสูบ (p) ระยะยกของวาล์วเข็มในหัวฉีด ( $I_N$ ) และความดันเชื้อเพลิงในท่อส่ง ( $p_i$ ) ที่เป็นฟังก์ชันของมุมข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงขนาดเล็ก

สำหรับกราฟของอัตราการปล่อยความร้อนกับมุมข้อเหวี่ยงที่สอดคล้องกับอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและข้อมูลความดันกระบอกสูบตามกราฟในรูปที่ 2.9 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นรูปแบบของกราฟอัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงชนิดนี้ตลอดช่วงภาระและอัตราเร็วเครื่องยนต์ กราฟอัตราการปล่อยความร้อนแสดงให้เห็นว่าไม่มีการปล่อยความร้อนจนกระทั่งปลายของจังหวะอัดจะเห็นได้ว่าการสูญเสียความร้อนเล็กน้อยในระหว่างช่วงล่าช้า (เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังห้องเผาไหม้ เพื่อการระเหยและการทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงร้อนขึ้น)

ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้นั้นจะเห็นว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นเป็น 3 ระยะที่ต่างกัน คือ ในระยะแรก อัตราการเผาไหม้โดยทั่วไปจะสูงมากและเกิดขึ้นในช่วงไม่กี่องศาของมุมข้อเหวี่ยง ซึ่งตรงกับช่วงของการเพิ่มความดันกระบอกสูบอย่างรวดเร็ว ระยะที่สองจะเป็นช่วงของอัตราการปล่อยความร้อนที่ค่อย ๆ ลดลง (แม้ว่าช่วงต้นอาจจะเพิ่มขึ้นไปยังค่าสูงสุดค่าที่สองจะต่ำกว่าค่าแรกมาก (รูปที่ 2.10) ช่วงการเผาไหม้นี้จะเป็นช่วงการปล่อยความร้อนหลัก โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในช่วง 40 องศา และตามปกติประมาณร้อยละ 80 ของพลังงานเชื้อเพลิงทั้งหมดถูกปล่อยออกมาในสองระยะแรก ระยะที่สามเป็นช่วงท้ายของการปล่อยความร้อนซึ่งอัตราการปล่อยความร้อนจะน้อยและจะเกิดขึ้นไปตลอดจังหวะการขยายตัวส่วนใหญ่ การปล่อยความร้อนในช่วงสุดท้ายนี้ตามปกติจะมีปริมาณร้อยละ 20 ของพลังงานทั้งหมดของเชื้อเพลิงเพลิงโดยประมาณ



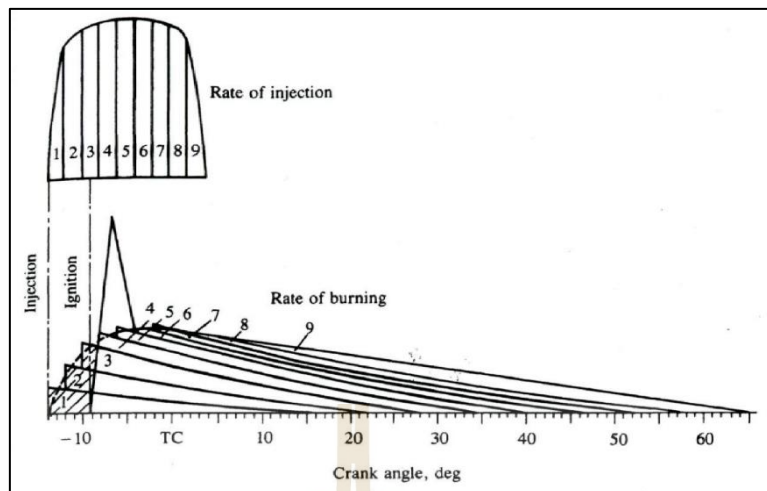
รูปที่ 2.10 ความดันกระบอกสูบ ( $p$ ), อัตราการฉีดเชื้อเพลิง ( $\dot{m}_f$ ) และอัตราการปล่อยความร้อน ( $\dot{Q}_n$ ) ที่คำนวณจากความดันกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงขนาดเล็ก ทำงานที่อัตราเร็ว 1,000 rev/min, จังหวะการฉีดตามปกติ และ  $b_{mep} = 620$  kPa

จากการศึกษากราฟของอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการปล่อยความร้อนดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ตลอดช่วงของภาระ อัตราเร็วเครื่องยนต์ และจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงลิน (Lyn) ได้สรุปผลการศึกษาไว้ 3 ข้อ คือ

- 1) ช่วงการเผาไหม้ทั้งหมดจะยาวกว่าช่วงการฉีดเชื้อเพลิง
- 2) อัตราการเผาไหม้สมบูรณ์เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อคิดเป็นมุมข้อเหวี่ยง ช่วงการเผาไหม้ก็จะคงตัว
- 3) ขนาดของค่าสูงสุดของกราฟอัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งจะสูงขึ้นเมื่อช่วงล่าช้ายาวขึ้น

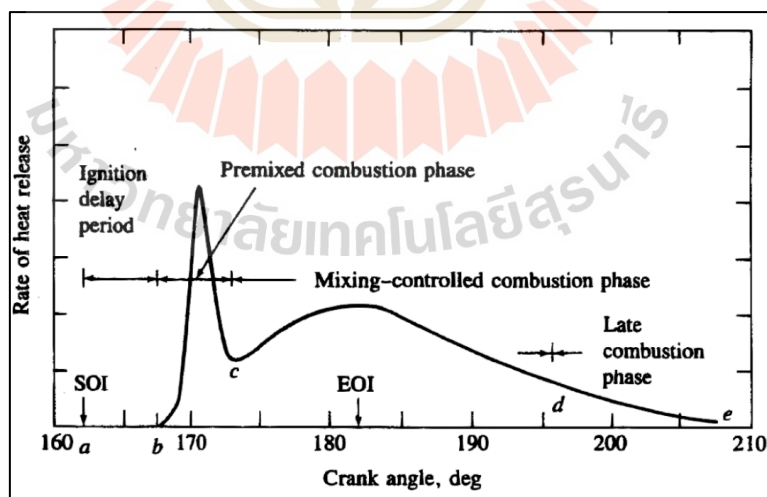
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟของอัตราการฉีดเชื้อเพลิงกับกราฟของอัตราการเผาไหม้โดยการแบ่งเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้เป็นส่วนย่อย ๆ หลายส่วน เชื้อเพลิงส่วนย่อยแรก เมื่อถูกฉีดเข้าไปก็จะไปผสมกับอากาศเป็นสารผสมที่พร้อมจะเผาไหม้ (ผสมอยู่ในขีดจำกัดที่เผาไหม้ได้) ซึ่งแสดงด้วยรูปสามเหลี่ยมรูปล่างสุดยาวตามแกนนอน แล้วส่วนย่อยที่สองและส่วนอื่น ๆ ที่ถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ก็จะผสมกับอากาศในลักษณะเดียวกัน ซึ่งจะได้ผ้งของสารผสมที่พร้อมจะเผาไหม้ที่ล้อมรอบโดยเส้นประ โดยพื้นที่ทั้งหมดของผ้งนี้จะเท่ากับพื้นที่ของผ้งหรือกราฟอัตราการฉีดเชื้อเพลิง แต่การจุดระเบิดไม่ได้เกิดขึ้นทันที ดังนั้นกราฟอัตราการเผาไหม้จึงไม่ได้เป็นไปตามผ้งของสารผสมที่พร้อมจะเผาไหม้ในช่วงแรก





รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการเผาไหม้หรือปล่อยพลังงาน

เมื่อผ่านช่วงล่าช้าไปแล้วก็จะเกิดการจุดระเบิดทำให้เกิดการเผาไหม้ของสารผสมที่พร้อมจะเผาไหม้พร้อมกัน อัตราการเผาไหม้จึงสูงแล้วก็จะลดลงมาเป็นอัตราเดียวกับอัตราการผสมรูปแบบของกราฟอัตราการเผาไหม้หรืออัตราการปล่อยพลังงานนี้โดยทั่วไปจะเป็นเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงที่มีการนำอากาศเข้าโดยธรรมชาติ



รูปที่ 2.12 อัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงทั่วไป แสดงช่วงต่าง ๆ ของการเผาไหม้

ช่วงต่าง ๆ ของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะสรุปได้จากกราฟอัตราการปล่อยความร้อน ดังรูปที่ 2.12

1) ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition delay period, ab) เป็นช่วงระหว่างการเริ่มต้นของการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้และการเริ่มต้นของการเผาไหม้ การเริ่มต้นการเผาไหม้หาได้จาก การเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟระหว่าง  $P - \theta$  หรือ ได้จากกราฟอัตราการปล่อยความร้อนที่หาจากข้อมูล  $P(\theta)$

2) ช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้วหรือช่วงการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Premixed combustion phase หรือ rapid combustion phase, bc) ในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ได้ผสมกับอากาศเป็นสารผสมที่อยู่ในขีดจำกัดของการเผาไหม้ในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งเมื่อเกิดเผาไหม้ก็จะเผาไหม้เกือบพร้อมกัน ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่องศาของมุมข้อเหวี่ยงและเป็นอัตราการปล่อยความร้อนในช่วงนี้สูง

3) ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase, cd) เมื่อเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งผสมกันไว้ก่อนแล้วในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดได้ถูกเผาไหม้หมดไป อัตราการเผาไหม้ (หรืออัตราการปล่อยความร้อน) จะถูกควบคุมโดยอัตราการเกิดสารผสมที่พร้อมเผาไหม้ (อัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ) อัตราการปล่อยความร้อนในช่วงนี้อาจไปถึงค่าสูงสุดค่าที่สอง (โดยทั่วไปจะต่ำกว่าค่าแรก) หรืออาจจะไม่ถึงก็ได้ แต่จะลดลงเมื่อกระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

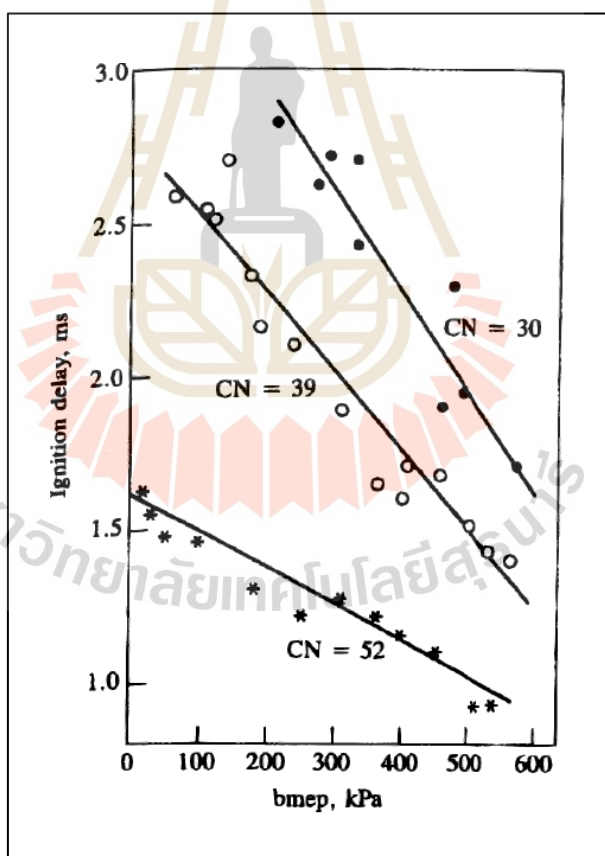
4) ช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, de) เป็นช่วงที่การปล่อยความร้อนเกิดขึ้นต่อไปที่อัตราต่ำในจังหวะขยายตัว ซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เล็กน้อย และเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น  $CO, H_2$  ฯลฯ)

#### 2.4.2 ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด

ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการเกิดสเปรย์และสภาวะอากาศ (ความดัน อุณหภูมิ และความเร็ว) จะมีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ การออกแบบของระบบฉีดเชื้อเพลิงและห้องเผาไหม้ และสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ตัวแปรของระบบฉีดเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเกิดสเปรย์ก็คือ จังหวะการฉีด, ปริมาณ, ความเร็ว, อัตราการฉีด, ขนาดหยด และรูปแบบของสเปรย์ส่วนสภาวะของอากาศจะขึ้นอยู่กับระบบการเผาไหม้ที่ใช้, รายละเอียดของการออกแบบห้องเผาไหม้, ความดันและอุณหภูมิที่เข้า, อัตราส่วนการอัด, จังหวะการฉีด, สภาวะของแก๊สที่ค้างอยู่, อุณหภูมิของสารหล่อเย็นและน้ำหล่อลื่น และอัตราเร็วเครื่องยนต์ ซึ่งพอสรุปปัจจัยที่สำคัญและผลที่มีต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดได้ดังต่อไปนี้

1) จังหวะการฉีด (Injection timing) ที่สภาวะการทำงานตามปกติของเครื่องยนต์ (อัตราเร็วต่ำถึงปานกลาง และเครื่องยนต์อุ่นเต็มที่แล้ว) ช่วงล่าช้าต่ำสุดเกิดเมื่อการเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงที่ประมาณ  $10^\circ$  ถึง  $15^\circ$  BTC ความล่าช้าที่ยาวนานขึ้นพร้อมด้วยจังหวะการฉีดก่อนหรือหลังจังหวะปกติเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิและความดันของอากาศเปลี่ยนแปลงไปมาก

2) ปริมาณการฉีด (Injection quantity) หรือภาวะ ความล่าช้าที่ลดลงกับภาระที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นตรงในเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากเมื่อภาระเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของแก๊สที่ค้างอยู่และอุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น เป็นผลให้อุณหภูมิของอากาศ (สารผสมระหว่างอากาศกับแก๊สที่ค้างอยู่) สูงขึ้น (และความดันของสารผสมสูงขึ้นเล็กน้อย) ที่จังหวะการฉีดจึงทำให้ความล่าช้าลดลง ดังรูปที่ 2.13 แสดงถึงผลของปริมาณการฉีด (หรือภาระ) ของเครื่องยนต์ที่มีผลต่อความล่าช้า



รูปที่ 2.13 ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่วัดได้ในเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง

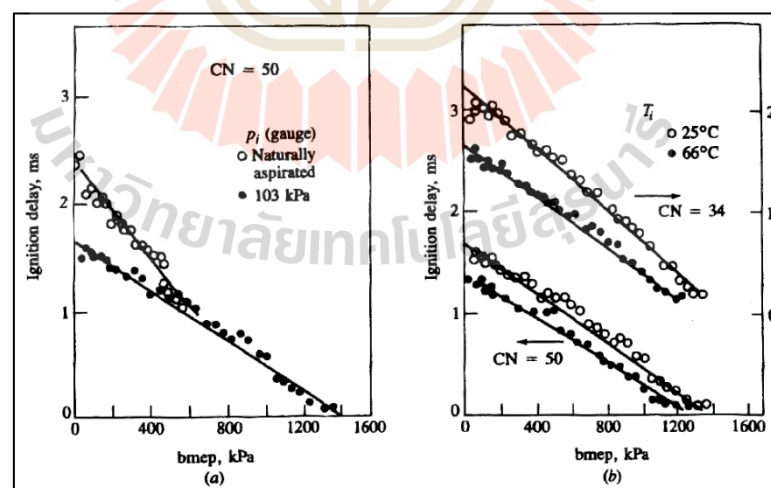
ที่จังหวะขนาดเล็กที่มี  $r_c = 16.5$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของภาระที่ 1,980 rev/min

เชื้อเพลิงมีเลขซีเทน 30, 39 และ 52

3) ขนาดของหยด ความเร็วการฉีด และอัตราการฉีด ปริมาณหรือค่าเหล่านี้ถูกกำหนดโดยความดันในการฉีด ขนาดรูหัวฉีด ชนิดของหัวฉีด และรูปร่างของรูหัวฉีด ซึ่งจากการทดลองพบว่าไม่มีปัจจัยใดในปัจจัยเหล่านี้ที่มีผลสำคัญต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด

ที่สภาวะการทำงานตามปกติ ความดันในการฉีดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความล่าช้าลดลงเล็กน้อย การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางรูหัวฉีดเป็น 2 เท่า ที่ความดันในการฉีดคงตัวเพื่อเพิ่มอัตราการไหล(ประมาณ 4 เท่า) และเพิ่มขนาดของหยด (ประมาณ 30%) จะไม่มีผลต่อความล่าช้าอย่างมีนัยสำคัญ และจากการศึกษารูปร่างของรูหัวฉีดต่างๆพบว่า การเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีดหรือการเปลี่ยนชนิดของหัวฉีดก็ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความล่าช้าอย่างมีนัยสำคัญภายใต้สภาวะการทำงานตามปกติของเครื่องยนต์

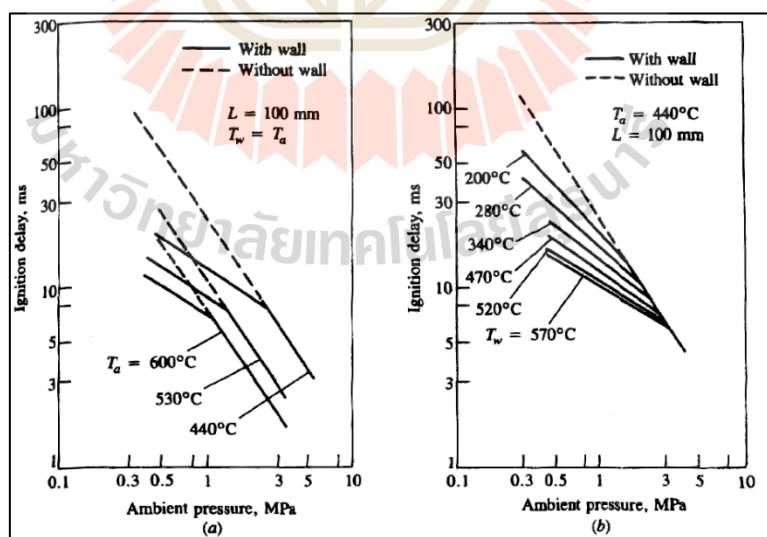
4) อุณหภูมิและความดันของอากาศที่นำเข้า อุณหภูมิและความดันของอากาศที่นำเข้าจะมีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดเนื่องจากอุณหภูมิและความดันของอากาศมีผลต่อสภาวะของสารผสมในช่วงล่าช้า ดังรูปที่ 2.14 แสดงผลของความดันและอุณหภูมิของอากาศที่นำเข้ากับ ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ภาระของเครื่องยนต์ต่าง ๆ เนื่องจากอุณหภูมิและความดันของอากาศในช่วงล่าช้าเป็นตัวแปรสำคัญ ดังนั้นตัวแปรอื่นที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะอากาศที่นำเข้าและสภาวะของสารผสมที่จังหวะการฉีดก็จะมีผลต่อความล่าช้าด้วย เช่น การเพิ่มอัตราส่วนการอัดจะไปลดความล่าช้าในการฉีด เป็นต้น



รูปที่ 2.14 ผลของความดันและอุณหภูมิของอากาศที่นำเข้ากับ ความล่าช้าในการจุดระเบิดตลอดช่วงภาระของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรงขนาดเล็กที่ 1,980 rev/min

5) อัตราเร็วเครื่องยนต์ การเพิ่มอัตราเร็วเครื่องยนต์ที่ภาระคงตัวเป็นผลให้ความล่าช้า (เมื่อวัดเป็น ms) ลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อวัดเป็นองศาหมุมข้อเหวี่ยงความล่าช้าจะเพิ่มเกือบเป็นเชิงเส้นตรงกับอัตราเร็วเครื่องยนต์ การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเครื่องยนต์จะไปเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันกับเวลา นอกจากนี้ เมื่ออัตราเร็วเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ความดันการฉีดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และอุณหภูมิการอัดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียความร้อนในช่วงจังหวะอัดน้อยลง

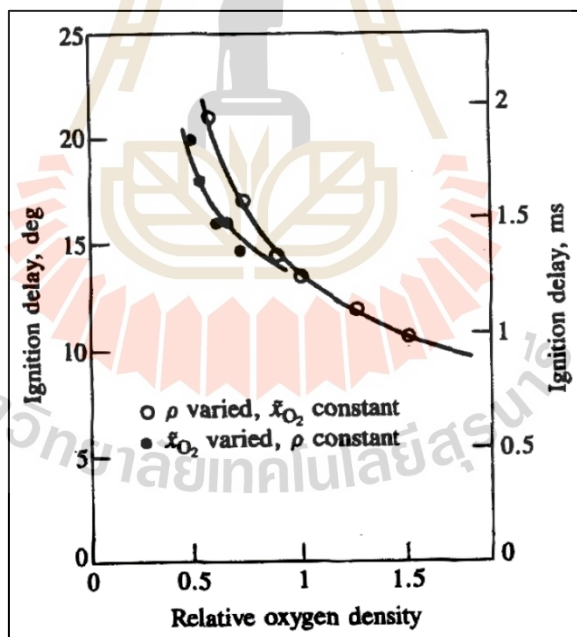
6) ผลของผนังห้องเผาไหม้ (Combustion chamber wall effect) การกระทบของสเปรย์บนผนังห้องเผาไหม้จะมีผลต่อกระบวนการระเหยและผสมของเชื้อเพลิง ซึ่งการกระทบของสเปรย์บนผนังจะเกิดขึ้นในเครื่องยนต์อัตราเร็วสูงขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ สำหรับระบบเอ็มต้องการให้สเปรย์ปะทะกับผนังห้องเผาไหม้เพื่อให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความล่าช้าในการจุดระเบิดของระบบเอ็มจึงยาวกว่าในเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงแบบทั่วไป ดังรูปที่ 2.15 แสดงผลของการกระทบของสเปรย์บนผนังที่อยู่ห่าง 100 mm จากหัวฉีดที่มีต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดจากการศึกษาการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบปริมาตรคงตัว ซึ่งพบว่า การมีผนังจะช่วยลดความล่าช้าในการจุดระเบิดจากการศึกษาการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบปริมาตรคงตัว ซึ่งพบว่า การมีผนังจะช่วยลดความล่าช้าที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ความดันและอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.15 ผลของการกระทบของสเปรย์บนผนังที่อยู่ห่าง 100 mm จากหัวฉีดที่มีต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดจากการศึกษาการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แบบปริมาตรคงตัว

7) อัตราการไหลวน (Swirl rate) การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลวนจะทำให้กระบวนการระเหยของเชื้อเพลิงและการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอัดซึ่งก็จะมีผลอุณหภูมิของอากาศที่เริ่มต้นการติด จากผลการศึกษาที่อัตราเร็วเครื่องยนต์ตามปกติพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลวนมีผลน้อยต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดแต่ภายใต้สภาวะการติดเครื่องยนต์ (อัตราเร็วเครื่องยนต์และอุณหภูมิการอัดต่ำ) ผลของอัตราการไหลวนก็จะมีมากขึ้นเนื่องจากอัตราของการระเหยและการผสมที่สูงขึ้นเมื่อมีการไหลวน

8) ความเข้มข้นของออกซิเจน ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารผสมเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปจะมีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลง เช่น เมื่อนำไอเสียกลับมาใช้อีก (EGR) เพื่อควบคุมปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน ความเข้มข้นของออกซิเจนก็จะลดลงซึ่งเป็นผลให้ช่วงล่าช้ายาวนานขึ้น ดังรูปที่ 2.16 แสดงผลของความหนาแน่นของออกซิเจนในแก๊สที่มีต่อความล่าช้าในการจุดระเบิด



รูปที่ 2.16 ผลของความหนาแน่นของออกซิเจนในแก๊สที่มีต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงสูบเดียวขนาด  $1.3 \text{ dm}^3$ ,  $r_c = 15$  ที่  $1,800 \text{ rev/min}$  ความหนาแน่นของออกซิเจนเปลี่ยนแปลงโดยแก๊สไอเสียที่นำกลับมาใช้อีก (EGR) ที่ความหนาแน่นเข้าคงตัว และโดยเปลี่ยนแปลงความดันเข้าจาก 0.5 ถึง 3 atm โดยใช้อากาศ

### 2.4.3 สหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิดในเครื่องยนต์

ฮาร์เดนเบิร์กและเฮส (Hardenberg and Hase) ได้พัฒนาสมการสหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงไว้ดังนี้ (John B. Heywood, 1998)

$$\tau_{id} = (0.36 + 0.22 \bar{S}_p) \exp \left[ E_A \left( \frac{1}{\tilde{R}T} - \frac{1}{17,190} \right) \left( \frac{21.2}{p - 12.4} \right)^{0.63} \right] \quad (2.11)$$

โดย  $\tau_{id}$  (CA) เป็นความล่าช้าในการจุดระเบิด (มีหน่วยเป็นองศาหมุนข้อเหวี่ยง),  $\bar{S}_p$  เป็นอัตราเร็วลูกสูบเฉลี่ย (มีหน่วยเป็น m/s),  $E_A$  เป็นพลังงานกระตุ้นปรากฏ (มีหน่วยเป็น J/mole),  $\tilde{R}$  เป็นค่าคงตัวของแก๊สสากล ( $\tilde{R} = 8.3143$  J/mol·K),  $T$  เป็นอุณหภูมิ (มีหน่วยเป็น K) และ  $p$  เป็นความดัน (มีหน่วยเป็น bar) ในช่วงล่าช้า (คิดที่ TC) ซึ่ง  $E_A$  จะหาได้จากสมการ คือ

$$E_A = \frac{618,840}{CN + 25} \quad (2.12)$$

โดย CN เป็นเลขซีเทน และช่วงล่าช้าเป็นมิลลิวินาที (ms) จะหาได้จาก

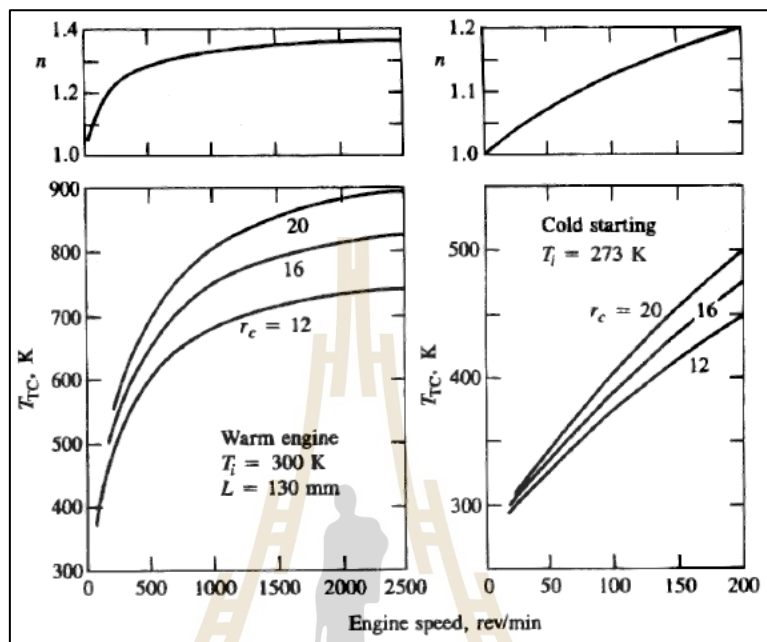
$$\tau_{id} = \frac{\tau_{id}(CA)}{0.006N} \quad (2.13-ก)$$

โดยที่  $\tau_{id}$  มีหน่วยเป็น ms

เมื่อ  $N$  เป็นอัตราเร็วเครื่องยนต์ (มีหน่วยเป็น rev/min) สำหรับค่า  $T$  และ  $p$  สามารถประเมินได้โดยพิจารณากระบวนการอัดเป็นกระบวนการพอลิทรอปิก คือ

$$T_{TC} = T_{rc}^{n-1} \text{ และ } p_{rc} = p_{rc}^n \quad (2.13-ข)$$

โดย  $n$  หาได้จากรูปที่ 2.17,  $r_c$  เป็นอัตราส่วนการอัด และครรชนีล่าง  $i$  หมายถึงสถานะในท่อไอดี



รูปที่ 2.17 ค่า  $n$  สำหรับกระบวนการอัดแบบพอลิทรอปิกในสมการที่ 2.13 และอุณหภูมิอากาศที่สิ้นสุดการอัด (ที่ TC) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรงที่อุ่นแล้วและที่เย็นระยะชักเท่ากับ 130 mm

#### 2.4.4 เครื่องยนต์ดีเซลและอัตราส่วนการอัด

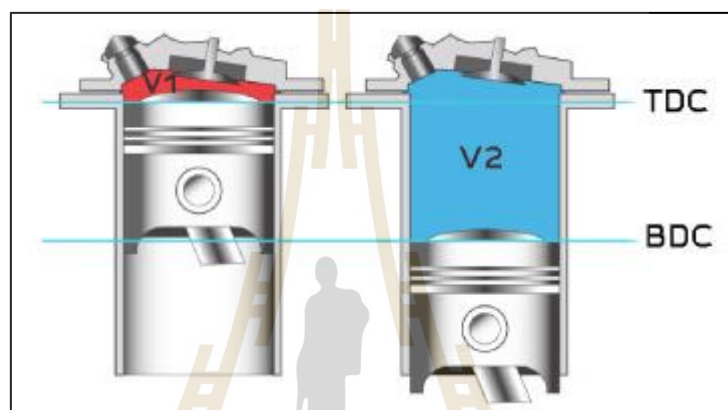
เครื่องยนต์ดีเซลจะไม่มีหัวเทียน จะใช้การอัดอากาศจนร้อน และหัวฉีดน้ำมันจะฉีดน้ำมันออกมา เราจะเรียกเครื่องยนต์นี้อีกอย่างว่า เครื่องยนต์อากาศอัด (Compressed Engine)

รูดอล์ฟ ดีเซล ให้ทฤษฎี การอัดด้วยแรงดันสูง จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง และได้กำลังงานมากกว่า เมื่อลูกสูบบีบอัดอากาศภายในกระบอกสูบ อากาศจะมีความหนาแน่นมากขึ้น พลังงานทางเคมีของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงมาก เมื่อน้ำมันดีเซลถูกฉีดเป็นฝอยเข้าไปในกระบอกสูบ น้ำมันดีเซลจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง ความดันสูงจึงเกิดการระเบิดอย่างรุนแรง ยิ่งมีการอัดตัวสูงเท่าไร การระเบิดก็จะให้กำลังงานได้มากอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ของเครื่องยนต์ดีเซลจึงมีความสำคัญ ดังนั้นอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซลจะอยู่ระหว่าง 14:1 จนถึง 25:1 ขณะที่อัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน



อยู่ที่ 8:1 ถึง 12:1 นี่จึงเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่เครื่องยนต์ดีเซลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้มากกว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

อัตราส่วนกำลังอัด คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรความจุของกระบอกสูบกับปริมาตรในกระบอกสูบในขณะที่ลูกสูบอยู่ศูนย์กลางบน ยกตัวอย่างเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดเท่ากับ 10 ก็คือ เครื่องยนต์ที่ลูกสูบสามารถบีบส่วนผสมในห้องเผาไหม้ให้เหลือเพียง 1 ใน 10 ของปริมาตรความจุ

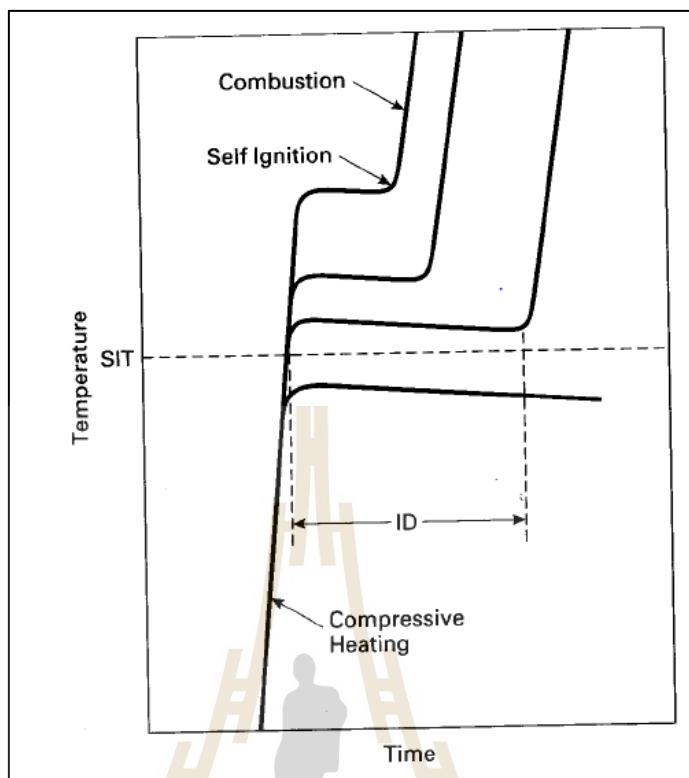


รูปที่ 2.18 ระยะการอัดตัวของลูกสูบ เพื่ออธิบายอัตราส่วนการอัด

$$\text{อัตราส่วนการอัด} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_{\text{BDC}}}{V_{\text{TDC}}} = \frac{(V_c + V_d)}{V_c} \quad (2.14)$$

ข้อดีของการมีอัตราส่วนกำลังอัดเครื่องยนต์ที่สูง คือ เครื่องยนต์ยังอัตราส่วนกำลังอัดมาก ถ้าให้เชื้อเพลิงเท่ากันย่อมมีแรงกระทำกับเพลาคือเหวี่ยงมากกว่าเครื่องยนต์ที่กําลังอัดน้อยกว่า นอกจากนี้การที่เครื่องยนต์มีกำลังอัดที่สูง ก็จะทำให้การเผาไหม้หมดจดมากขึ้นทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงมากกว่า

ข้อเสียของเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดสูง คือ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะสูง ทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ผิดจังหวะก่อให้เกิดแรงดันการเคลื่อนที่ของลูกสูบขึ้นมากเกินไปทำให้เกิดความเค้นมากกว่าปกติที่กํานลูกสูบซึ่งจะทำให้เครื่องยนต์เสียหายได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอาการ Engine knock หรือการที่มีการจุดระเบิดผิดเวลา ควรใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่น องศาการฉีดและอัตราส่วนการอัด



รูปที่ 2.19 กราฟการลุกไหม้ของเชื้อเพลิง หากอุณหภูมิของเชื้อเพลิง สูงกว่าอุณหภูมิลุกไหม้เอง (SIT) เชื้อเพลิงจะลุกไหม้หลังช่วงเวลาหนึ่ง (ID) ยิ่งอุณหภูมิสูงกว่า SIT ช่วง ID ก็จะยิ่งสั้นลงซึ่งโดยทั่วไปจะกินเวลาไม่กี่ส่วน ในพันส่วนของวินาที  
คัดจาก (TIZARD and PYE, Philosophical Magazine, July 1922)

ผลกระทบจากการปรับอัตราส่วนการอัดเครื่องยนต์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการบ่งชี้สมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด หรือเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ได้แก่ กำลังเบรก ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก จากผลการวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยการปรับอัตราส่วนการอัด โดย Bora and Saha (2016) ได้ศึกษาผลของการปรับอัตราส่วนการอัดต่อการเผาไหม้และการปล่อยมลพิษของไบโอดีเซลรำข้าวและไบโอแก๊ส สำหรับการทดลองใช้เครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงผสม 1 ลูกสูบ แบบฉีดตรง (DI), เครื่องยนต์ดีเซลไร้ระบบอัดอากาศ (NA), เครื่องยนต์ดีเซลที่ผ่านการระบายความร้อนด้วยน้ำ, สามารถปรับอัตราส่วนแรงอัดที่บีบอัดได้ (VCR) การทดลองดำเนินการทดลองด้วยอัตราการบีบอัด (CR) ที่แตกต่างกันคือ 18, 17.5 และ 17 และคงที่เวลาการฉีดที่ 23 องศา ก่อนจุดศูนย์ตายบนภายใต้สภาพโหลดที่แตกต่างกัน เมื่อใช้โหลด

เต็มประสิทธิภาพการเบรกด้วยเบรค (BTEs) ภายใต้โหมดเชื้อเพลิงแบบคู่ (DFM) มีค่าเท่ากับ 20.27% ที่ CR18 19.97% ที่ CR17.5 และ 18.39% ที่ CR17 สำหรับสภาพการบรรทุกเดียวกัน การเปลี่ยนเชื้อเพลิงเหลว (LFR) สูงสุดเท่ากับ 80% ที่ CR18 79% ที่ CR17.5 และ 78.2% ที่ CR17 โดยเฉลี่ยแล้วมีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนลง 17.67% และ 17.18% ตามลำดับ เมื่อ CR เพิ่มขึ้นจาก 17 เป็น 18 แต่สำหรับการตั้งค่า CR เดียวกันจะมีการเพิ่มออกไซด์ของไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ 42.85% และ 14.13% ตามลำดับ และพบว่าอัตราส่วนการอัดของ 18 มีประสิทธิภาพในการเบรคสูงสุด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดคือ 20.27% ในโหมดเชื้อเพลิงคู่ การเปลี่ยนเชื้อเพลิงเหลวสูงสุดที่ 80% ได้จากอัตราส่วนการอัดของ 18 CO จะลดลง 17.67% โดยมีอัตราส่วนการอัดขึ้นจาก 17 เป็น 18 HC จะลดลง 17.18% ด้วยอัตราการบีบอัดที่เพิ่มขึ้นจาก 17 เป็น 18

ทั้งนี้ จากผลการวิจัยที่ผ่านมาในด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษที่เกิดขึ้นจากการปรับอัตราส่วนการอัดผู้วิจัยได้ทำการสรุปไว้ดังตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.3 สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการอัด (Compression ratio)

Authors Names	Title	BTE	BSFC	HC	CO	NO <sub>x</sub>	Smoke	Ignition Delay
Bharadwaz, Y. D., et al. (2016)	Improvement of biodiesel methanol blends performance in a variable compression ratio engine using response surface methodology	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	-
Bora, B. J. and U. K. Saha (2016)	Experimental evaluation of a rice bran biodiesel-biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง
Chhabra, M., et al. (2017)	Performance evaluation of diesel engine using rice bran biodiesel	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	-
Dubey, P. and R. Gupta (2018)	Influences of dual bio-fuel (Jatropha biodiesel and turpentine oil) on single cylinder variable compression ratio diesel engine	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง

ตารางที่ 2.3 สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) (ต่อ)

Authors Names	Title	BTE	BSFC	HC	CO	NO <sub>x</sub>	Smoke	Ignition Delay
Sivaramakrishnan, K. (2017)	Investigation on performance and emission characteristics of a variable compression multi fuel engine fuelled with Karanja biodiesel–diesel blend	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	-
Suresh, M., et al. (2018)	A review on biodiesel production, combustion, performance, and emission characteristics of non-edible oils in variable compression ratio diesel engine using biodiesel and its blends	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	-
Muralidharan, K. and D. Vasudevan (2011)	Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	-

## 2.5 พืชน้ำมันที่นำมาใช้ในงานวิจัย

### 2.5.1 ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm)

ปาล์มน้ำมันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ “*Elaxis quineensis* Jacq” อยู่ในวงศ์ Areacaceae หรือ Palmae แหล่งปลูกในปัจจุบัน ปัจจุบันการปลูกปาล์มน้ำมันได้แพร่หลายไปในหลายประเทศ เช่น มาเลเซีย, อินโดนีเซีย, ไนจีเรีย, ไทย, โคลัมเบีย, อินเดีย และแหล่งปลูกใหม่ของประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น พม่า กัมพูชา ประเภทของปาล์มน้ำมัน จำแนกตามลักษณะผล มี 3 แบบ คือ ดุรา พิติเฟอรา และเทนอรา เริ่มให้ผลอายุ 30 เดือน (นับจากวันที่ปลูกลงแปลง) และมีขนาดทะลายโตเต็มที่ อายุ 5 ปีขึ้นไป (ขนาดทะลายควรมีน้ำหนักเฉลี่ยมากกว่า 15 กก./ทะลาย) รอบการเก็บเกี่ยวผลผลิต ประมาณ 15 วันต่อครั้ง อายุการเก็บเกี่ยวของปาล์มน้ำมัน ประมาณ 25 ปี ระยะห่าง (เนื้อที่) ในการปลูก จำนวนต้นปลูกเฉลี่ย 22.8 ต้นต่อไร่ ทะลายปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย ก้านทะลาย ช่อทะลายย่อย และผลในแต่ละทะลายมีปริมาณผล 45-70% ทะลายปาล์มน้ำมันเมื่อสุกเต็มที่จะมีน้ำหนักประมาณ 1- 60 กก. ผลปาล์มน้ำมัน ไม่มีก้านผล (sessile drup) รูปร่างมีหลายแบบ ทั้งแบบเรียวยาวแหลม รูปไข่ หรือรูปยาวรี ความยาวผลอยู่ระหว่าง 2-5 ซม. น้ำหนักผล 3-30 กรัม ผลปาล์มประกอบด้วยผิวเปลือกนอก (Exocarp) ชั้นเปลือกนอก (Mesocarp) เป็นเนื้อเยื่อเส้นใย สีส้มแดงเมื่อสุกและมีน้ำมันอยู่ในชั้นนี้



รูปที่ 2.20 ปาล์มน้ำมัน ก) ต้นปาล์มน้ำมัน ข) ผลปาล์มน้ำมัน

น้ำมันปาล์มนั้นได้จาก 2 ส่วนของปาล์ม คือ ส่วนเปลือกนอกประมาณ 16-25 % ของน้ำหนักทะลายและส่วนเนื้อในประมาณ 3-5% ของน้ำหนักทะลาย

น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการกลั่น น้ำมันปาล์มดิบใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่อุตสาหกรรม โอลีโอเคมีคอลการผลิตวิตามิน E รวมถึง

อุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่น น้ำมันเมล็ดในปาล์ม ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น นมข้นหวาน ไอศกรีม เนยขาว เป็นต้น ใช้ในอุตสาหกรรมโพลิโอเคมีคอล อุตสาหกรรมโพลิโอเคมีคอล รวมถึง อุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล

### 2.5.2 น้ำมันมะพร้าว (Coconut Oil)

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้นชนิดหนึ่ง อยู่ในตระกูลปาล์ม มะพร้าว เป็นพืชซึ่งสามารถ ใช้ประโยชน์ได้ในหลายทาง เช่น น้ำและเนื้อมะพร้าวอ่อนใช้รับประทาน เนื้อในผลแก่นำไปขูด และคั้นทำกะทิ กะหลานำไปประดิษฐ์สิ่งของต่าง ๆ เช่น กระบาย โคมไฟ เป็นต้น นอกจากนี้มะพร้าว จัดเป็นพรรณไม้มงคลชนิดหนึ่ง ตามตำราพรหมชาติฉบับหลวง ได้กำหนดให้ปลูกมะพร้าวไว้ทาง ทิศตะวันออกของบ้านเพื่อความเป็นสิริมงคล

#### ลักษณะทั่วไปมะพร้าว

มะพร้าว เป็นพืชยืนต้น ใบมีลักษณะเป็นใบประกอบแบบขนนก ผลประกอบด้วย เอพิคาร์ป (Epicarp) คือเปลือกนอก ถัดไปข้างในจะเป็นมีโซคาร์ป (mesocarp) หรือใยมะพร้าว ถัดไปข้างในเป็นส่วนเอนโดคาร์ป (Endocarp) หรือกะลามะพร้าว ซึ่งจะมีรูกลีลาอยู่ 3 รู สำหรับอก ถัดจากส่วนเอนโดคาร์ปเข้าไปจะเป็นส่วนเอนโดสเปิร์มหรือที่เรียกว่าเนื้อมะพร้าว ภายในมะพร้าว จะมีน้ำมะพร้าวซึ่งน้ำมะพร้าวเกิดจากเอนโดสเปิร์มของมะพร้าวซึ่งจะมีเอนโดสเปิร์มทั้งของแข็ง และของเหลว คือ เอนโดสเปิร์มของแข็งจะเป็นเนื้อมะพร้าว และเอนโดสเปิร์มทั้งของเหลวจะเป็น น้ำมะพร้าว ซึ่งเมื่อมะพร้าวแก่ เอนโดสเปิร์มก็จะดูดเอาน้ำมะพร้าวไปหมด ขณะที่มะพร้าวยังอ่อน ชั้นเอนโดสเปิร์ม (เนื้อมะพร้าว) ภายในผลมีลักษณะบางและอ่อนนุ่ม ภายในมีน้ำมะพร้าว ซึ่งใน ขณะนี้เรามักสอยเอามะพร้าวมารับประทานน้ำและเนื้อ เมื่อมะพร้าวแก่ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ เปลือกนอกเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ชั้นเอนโดสเปิร์มก็จะหนาและแข็งขึ้น จนในที่สุดมะพร้าวก็ หล่นลงจากต้น

#### ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มะพร้าว มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Cocos nucifera L.” อยู่ในตระกูล Palmae มีระบบ รากเป็นรากฝอยมีขนาดเท่า ๆ กัน แผ่กระจายออกรอบต้น

ลำต้น มีลำต้นเดี่ยว ไม่แตกแขนง มีรอยแผลจากการหลุดร่วงของใบตลอดลำต้น สามารถคำนวณอายุของต้นมะพร้าวได้จากรอยแผลนี้ คือ ในปีหนึ่งมะพร้าวจะสร้างใบประมาณ 12-14 ใบ ดังนั้นใน 1 ปี จะมีรอยแผลที่ลำต้น 12-14 รอยแผล

ใบ เป็นใบประกอบ ออกอยู่ตามส่วนของลำต้น ประกอบด้วยก้านทาง (Rechis) มีขนาดใหญ่และยาว และมีใบย่อย (Leaflet) บนก้านทางประมาณ 200-250 ใบ

**ดอก** ออกเป็นช่อชนิดพานิกิล มีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมีย อยู่ในช่อเดียวกัน ดอกมีกลีบดอก 6 กลีบ สีครีมหรือสีเหลืองนวล ไม่มีก้านดอกย่อยดอกตัวเมียจะมีกลีบดอกหนาและแข็งแรงกว่ากลีบดอกตัวผู้

**ผล** มะพร้าวเป็นชนิดไฟบรัสครูป (Fibrous drupe) เรียกว่า “นัท (Nut)” มีเปลือก 3 ชั้น คือ

1. เปลือกชั้นนอก (Exocarp) เป็นเส้นใยที่เหนียวและแข็ง เมื่อแก่อาจมีสีเขียวแดง เหลืองหรือน้ำตาล

2. เปลือกชั้นกลาง (Mesocarp) มีลักษณะเป็นเส้นใย มีความหนาพอประมาณ

3. เปลือกชั้นใน (Endocarp) มีลักษณะแข็งหรือที่เรียกกันว่า “กะลา (Shell)”

**เมล็ด (Seed of kernel)** คือ เนื้อมะพร้าว ภายในเมล็ดเป็นช่อกลวงขณะผลอ่อนจะมีน้ำอยู่เต็ม ผลแก่น้ำมะพร้าวจะแห้งไปบางส่วน

**พันธุ์** มะพร้าวเป็นพืชผสมข้ามพันธุ์ แต่ละต้นจึงไม่เป็นพันธุ์แท้ อาศัยหลักทางการผสมพันธุ์ที่เป็นไปโดยธรรมชาติ อาจแบ่งมะพร้าวออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทต้นเตี้ย และประเภทต้นสูง (Hahn, William J. (1997). *Arecanae: The palms*. Retrieved April 4, 2011 from the Tree of Life Web Project website.)

**ประเภทต้นเตี้ย** มะพร้าวประเภทนี้ มีการผสมตัวเองค่อนข้างสูง จึงมักให้ผลดกและไม่ค่อยกลายพันธุ์ ส่วนใหญ่นิยมปลูกไว้เพื่อรับประทานผลอ่อน เพราะในขณะที่ยังไม่แก่อายุประมาณ 4 เดือน เนื้อมีลักษณะอ่อนนุ่ม และน้ำมีรสหวาน บางพันธุ์น้ำมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีกลิ่นหอม

**ลักษณะทั่วไปของประเภทต้นเตี้ย** ลำต้นเล็ก โคนต้น ไม่มีสะเก โคนต้น เตี้ย โตเต็มที่สูงประมาณ 12 เมตร ทางใบสั้น ถ้ามีการดูแลปานกลางจะเริ่มให้ผลเมื่ออายุ 3-4 ปี ให้ผลผลิตประมาณ 35-40 ปี มะพร้าวประเภทต้นเตี้ยมีหลายพันธุ์ แต่ละพันธุ์มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น เปลือกสีเขียวเหลืองนวล (สิงาช้าง) น้ำตาลแดง หรือสีส้ม น้ำมีรสหวาน มีกลิ่นหอม มะพร้าวต้นเตี้ยทุกพันธุ์จะมีผลขนาดเล็ก เมื่อผลแก่มีเนื้อบางและน้อย ซึ่งได้แก่ พันธุ์กลุ่ม หมูสีเขียว หมูสีเหลือง หรือนาฬิกา มะพร้าวเตี้ย น้ำหอม และมะพร้าวไฟ แต่ปัจจุบันมะพร้าวน้ำหอมกำลังเป็นพืชเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการบริโภคสดและส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศ ตลอดจนใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม

**ประเภทต้นสูง** ตามปกติมะพร้าวต้นสูงจะผสมข้ามพันธุ์ คือ ในแต่ละช่อดอก (จั่น) หนึ่ง ๆ ดอกตัวผู้จะค่อย ๆ ทอยบาน และร่วงหล่นไปหมดก่อนที่ดอกตัวเมียในจั่นนั้นจะเริ่มบาน



จึงไม่มีโอกาสผสมตัวเอง มะพร้าวประเภทนี้เป็นมะพร้าวเศรษฐกิจส่วนใหญ่ปลูกเป็นสวนอาชีพ เพื่อใช้เนื่องจากผลแก่ไปประกอบอาหาร หรือเพื่อทำมะพร้าวแห้งใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช

**ลักษณะทั่วไปของประเภทต้นสูง** ลำต้นใหญ่ โคนต้นมีสะเกโทกใหญ่ ต้นสูง โตเต็มที่สูงประมาณ 18 เมตร ทางใบใหญ่และยาว ถ้ามีการดูแลปานกลางจะเริ่มให้ผลเมื่ออายุ 5-6 ปี อายุยืนให้ผลผลิตนานประมาณ 80 ปี มะพร้าวต้นสูงมีผลโตเนื้อหนาปริมาณเนื้อมาก มีลักษณะภายนอกหลายอย่างที่แตกต่างกัน เช่น ผลขนาดกลาง ขนาดใหญ่ รูปผลกลม ผลรี บางพันธุ์เปลือกมีลักษณะพิเศษ คือ ในขณะที่ผลยังไม่แก่ เปลือกตอนส่วนหัวจะมีรสหวานใช้รับประทานได้ จึงมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ได้แก่ พันธุ์กะโหลก มะพร้าวใหญ่ มะพร้าวกลาง ปากจก ทะลายร้อย เปลือกหวาน และมะพร้าว มะพร้าวพันธุ์ลูกผสมแม้ว่ามะพร้าวพื้นเมืองที่เกษตรกรปลูกกันมาแต่ดั้งเดิมจะมีลักษณะดีหลายอย่าง เช่น มีขนาดผลค่อนข้างโต และทนทานต่อสภาพอากาศแล้งได้ดี แต่ในวงการอุตสาหกรรมมะพร้าวในปัจจุบันได้พัฒนาทางด้านคุณภาพมะพร้าวมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณเปอร์เซ็นต์น้ำมัน ศูนย์วิจัยพืชสวนชุมพร กรมวิชาการเกษตรมีหน้าที่รับผิดชอบด้านวิจัยและพัฒนามะพร้าวได้ผลิตมะพร้าวพันธุ์ลูกผสม ซึ่งได้ผ่านการรับรองพันธุ์ออกมาแล้ว 2 พันธุ์ ดังนี้

**พันธุ์สวีลูกผสม 1 (Sawi Hybrid No.1)** เป็นมะพร้าวพันธุ์ลูกผสมที่เกิดจากการผสมระหว่างมะพร้าวพันธุ์มลายูสีเหลืองต้นเดี่ยว x เวสต์ออฟริกันต้นสูง (MYD x WAT) ลักษณะเด่นของมะพร้าวพันธุ์นี้คือ มีอายุการตกผลเร็ว สามารถเก็บผลผลิตได้ในปีที่ 5 ผลผลิตเฉลี่ย 2,781 ผลต่อไร่ หรือคิดเป็นน้ำหนักแห้ง 566 กก.ต่อไร่ จากจำนวนมะพร้าว 22 ต้นต่อไร่ เนื้อมะพร้าวแห้งมีเปอร์เซ็นต์น้ำมันสูงถึง 64% จึงเป็นมะพร้าวที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมน้ำมันมะพร้าวมาก

**พันธุ์ชุมพรลูกผสม 60-1 (Chumphon Hybrid 60-1)** เป็นมะพร้าวลูกผสมที่เกิดจากการผสมระหว่างพันธุ์เวสต์ออฟริกันต้นสูง x ไทยต้นสูง สามารถเก็บผลผลิตได้ในปีที่ 5 หลังจากปลูก ขนาดผลมีตั้งแต่ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ผลผลิตเฉลี่ย 2,257 ผลต่อไร่ หรือคิดเป็นน้ำหนักมะพร้าวแห้งสูงถึง 628 กก.ต่อไร่ เนื้อมะพร้าวแห้งมีเปอร์เซ็นต์น้ำมันสูง 63 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากขนาดผลของมะพร้าวพันธุ์นี้ค่อนข้างโตกว่าพันธุ์สวีลูกผสม 1 จึงสามารถจำหน่ายได้ทั้งผลสดและในรูปมะพร้าวแห้งส่งโรงงานสกัดน้ำมัน มะพร้าวลูกผสมทั้ง 2 พันธุ์ ให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์พื้นเมืองเกือบ 2 เท่า กล่าวคือ พันธุ์ไทยให้ผลผลิต 1,084 ผลต่อไร่ คิดเป็นผลผลิตเนื้อมะพร้าวแห้ง 374 กก.ต่อไร่ และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์น้ำมัน 59-60 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.21 น้ำมันมะพร้าวและลูกมะพร้าว

### 2.5.3 น้ำมันรำข้าว (Rice bran oil)

รำข้าว (Rice bran) คือ เยื่อหุ้มเมล็ดของข้าว ซึ่งถูกขัดสีออกในการขัดสีให้ได้ข้าวสาร รำข้าวมีน้ำมันอยู่ประมาณ 20% ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) เช่น Oleic acid, Linoleic acid, Linolenic acid ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential fatty acid) รำข้าวจึงเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตน้ำมันรำข้าว (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

น้ำมันรำข้าว คือ น้ำมันพืชที่ผลิตจากน้ำมันรำข้าวคิบ ซึ่งสารสกัดจากรำข้าวมีสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น วิตามินอี ในกลุ่มโทโคฟีรอลประมาณ 19-40% และกลุ่มโทโคไตรอีนอล 51-81% และโอริซานอล (Oryzanol) ซึ่งสามารถต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าวิตามินอีถึง 6 เท่า มีกรดไขมันอิ่มตัว 18% กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated Fatty Acid : MUFA) 45% กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated Fatty Acid : PUFA) 37% น้ำมันรำข้าวเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการลดคอเลสเตอรอลที่ไม่ดี (LDL-Cholesterol)



รูปที่ 2.22 น้ำมันรำข้าว

## 2.6 ไบโอดีเซล

### 2.6.1 บทนำ

ไบโอดีเซล (Biodiesel) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จากการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาผ่านกระบวนการทางเคมีโดยทำปฏิกิริยาเคมีกับแอลกอฮอล์ ส่วนใหญ่ใช้เมทานอล (Methanol) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันพืชซึ่ง เป็นสารประกอบพวกไตรกลีเซอริน (Triglycerides) เป็นสารประกอบ เอสเทอร์ (Ester) หรือเรียกเอสเทอร์ดังกล่าวว่า “ไบโอดีเซล” ส่วนกลีเซอรินที่ได้จากการผลิตเป็นผลพลอยได้ ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง สบู่ เป็นต้น

น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็นสารประกอบพวกไตรกลีเซอริน มีคาร์บอนไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุล ส่วนน้ำมันดีเซลมีเฉพาะคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ น้ำมันพืชจึงมีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างจากน้ำมันดีเซล ทำให้น้ำมันทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันอย่างมาก เช่น น้ำมันพืชมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าและมีความหนืดมากกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 10 เท่า ทำให้ฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ยาก เป็นปัญหาในการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิด

การสันดาปไม่สมบูรณ์ อีกทั้งน้ำมันพืชระเหยเป็นไอได้น้อยกว่าน้ำมันดีเซลมากทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยาก เครื่องยนต์สตาร์ทติดยาก และหลงเหลือเป็นคราบเขม่า ที่หัวฉีด เป็นต้น ทำให้น้ำมันพืชไม่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยตรง ต้องใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมีแล้ว เพื่อให้โครงสร้างโมเลกุลเล็กลงกว่าน้ำมันพืช และมีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซล

## 2.6.2 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตและการนำไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาใช้งานนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ตั้งแต่การนำมาเจือจางหรือผสมโดยตรงกับน้ำมันดีเซล เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งในปัจจุบันมี 3 วิธีหลักที่นิยมนำมาใช้ในการพัฒนาคุณภาพเพื่อลดความหนืดที่สูงของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ สำหรับการนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยเรียกได้ว่าเป็นวิธีผลิตไบโอดีเซลคือ การทำไมโครอิมัลชัน การแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส และการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

### 1) การเจือจางหรือการผสม (Dilution or Blending)

การเจือจางหรือการผสมกับน้ำมันดีเซลโดยตรงนั้น คือ การนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง หรือน้ำมันหมู เป็นต้น ผสมกับน้ำมันดีเซลโดยตรงในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ซึ่งจากผลการศึกษาโดยทั่วไปแล้วพบว่า น้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ได้ดีในระยะสั้น อย่างไรก็ตาม หากนำไปใช้ในระยะยาวจะส่งผลเสียต่อเครื่องยนต์ ทั้งการนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยมีสาเหตุจากค่าความหนืดที่สูงของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ องค์ประกอบที่เป็นกรด ปริมาณกรดไขมันอิสระ การสะสมของคาร์บอน (Carbon Deposition) เกิดยางเหนียวเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และเกิดพอลิเมอร์เซชัน (Polymerization) ระหว่างการเก็บรักษาและการเผาไหม้ ส่งผลทำให้ระบบทางเดินน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการอุดตัน หรือทำให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยได้ไม่ดี (Agarwal, 2007; วรวิทย์ จุฬาลักษณ์านุกุล, 2558)

### 2) การทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

การทำไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวในสถานะสมดุล โดยมีอนุภาคในคอลลอยด์ส่วนมากอยู่ในช่วง 1-150 นาโนเมตร โดยใช้ควมคู่กับตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ให้มีค่าความหนืดลดลง ไมโครอิมัลชันที่เกิดจากเมทานอลกับน้ำมันพืชจะได้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ เมื่อทำการทดสอบสมรรถนะของ

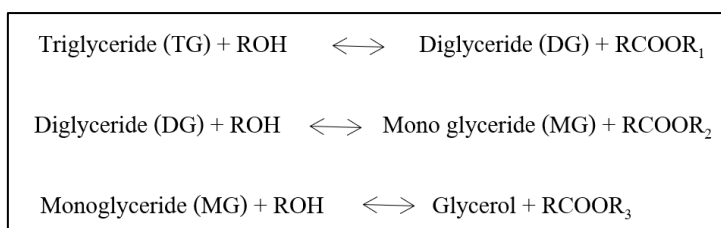
เครื่องยนต์ในระยะสั้นโดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการทำไมโครอิมัลชันพบว่า สมรรถนะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าจะมีค่าเลขซีเทนและปริมาณพลังงานที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์ระยะยาวพบว่า มีการสะสมตัวของคราบที่เป็นสารประกอบคาร์บอนเกาะรอบ ๆ หัวฉีด และวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้ (Agarwal, 2007)

### 3) การแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส (Thermal Cracking or Pyrolysis)

กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนจากสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งชนิด โดยให้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้จะต้องจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Wan Ghazali et al., 2015) อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450-600 องศาเซลเซียส สารประกอบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งกระบวนการนี้ยากที่จะกำหนดหรือควบคุมให้ได้ผลิตตามที่ต้องการ เนื่องจากความหลากหลายทางปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ วัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ น้ำมันพืช ไบโอมัสสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติและเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

### 4) การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification Reaction)

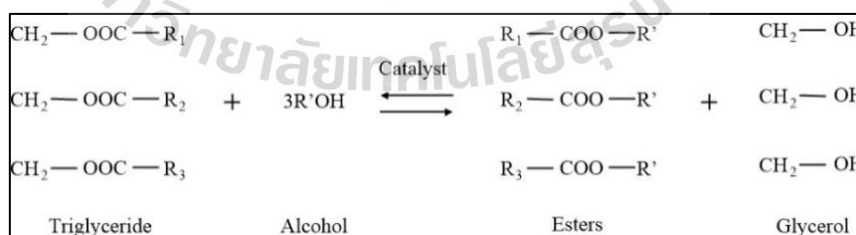
การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเคลื่อนย้ายหมู่แอลคิลของเอสเทอร์หรือไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยแบบผันกลับได้ 3 ขั้นตอน คือ โดยเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ (Agarwal, 2007) และการเปลี่ยนแปลงสุดท้ายโมโนกลีเซอไรด์เกิดเป็นกลีเซอรอล และทำให้เกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์ตัวใหม่ขึ้นหรือเมทิลเอสเทอร์ (Patel and Sankhavar, 2017) ได้แก่ สารจำพวกเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.23 กลไกการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Mahmudul et al., 2017)

### 2.6.3 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้นเป็นชื่อเรียกโดยทั่วไปของปฏิกิริยาอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ลดค่าความหนืดของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ และปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงให้มีลักษณะคล้ายกับน้ำมันดีเซลสามารถทำได้โดยการนำไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทั้งที่ใช้แล้วและยังไม่ได้ใช้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับสารประเภทแอลกอฮอล์ไฮดรอกซิล เช่น เมทานอลหรือเอทานอล ทั้งนี้เมทานอลจะเป็นที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับแอลกอฮอล์ชนิดอื่น อีกทั้งยังมีข้อดีในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีคือ เป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีขั้ว คุณสมบัติดังกล่าวสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลได้อย่างรวดเร็วและสามารถละลายตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถใช้ได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี กรด ค่าง หรือตัวเร่งชีวภาพ อาทิเช่น กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือลิเพส เป็นต้น สำหรับสัดส่วนในการทำปฏิกิริยาของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์แล้วพบว่าใช้อัตราส่วนโดยโมลแอลกอฮอล์คือน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็น 3:1 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่านั้น เนื่องจากจะให้ผลผลิตสูงสุดที่มากขึ้นและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาล้นลง (Patel and Sankhavar, 2017) และเมื่อทำปฏิกิริยาจนเสร็จสมบูรณ์ จะได้ผลผลิตออกมาเป็นกลีเซอรอล และเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือที่เรียกว่า “ไบโอดีเซล” ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Stephen R. Turns, 2012)

การเรียกชื่อของไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ยกตัวอย่างเช่น เอทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เอทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา หรือเมทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เมทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้

การผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบต่าง ๆ นั้นจะมีวิธีการผลิตและเงื่อนไขของกระบวนการผลิตที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ก็จะส่งผลต่อผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ตารางที่ 2.4 วิธีการผลิตไบโอดีเซลจากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ (Tamilselvan et al., 2017; Verma et al., 2016)

วัตถุดิบ	สารตั้งต้น	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโมล (Oil : Alcohol)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ผลผลิต (%)
Jatropha	Methanol	KOH	5 : 1	60	1	-
Mahua oil	Ethanol	Sulfuric acid	20 : 1	72 - 75	5	-
Palm oil	Methanol	NaOH	6 : 1	65	3	87.00
Pongamia	Methanol	KOH	20 : 3	55 - 65	0.75	-
Neem oil	Methanol	NaOH	3 : 1	55 - 61	6 - 7	95.00
Rapeseed oil	Methanol	CaO	15 : 1	65	3	94.60
Rice bran oil	Methanol	KOH	6 : 1	70	1	94.00
Rubber seed	Methanol	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3 : 1	60	2	91.05
Soybean oil	Methanol	KOH	9 : 1	60	1	93.20
Sunflower	Methanol	NaOH	6 : 1	60	2	97.10
Waste cooking oil	Methanol	10%MgO/TiO <sub>2</sub>	50 : 1	170	-	91.60
Castor oil	Methanol	KOH	8 : 1	25 - 80	120	87.30

## 2.6.4 การนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์

### 1) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซล

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ และคุณลักษณะของการเกิดมลพิษ โดยปกติแล้วคุณสมบัติหลัก ๆ ของไบโอดีเซลที่ทำการพิจารณา ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น จำนวนซีเทน ค่าความร้อน เชื้อเพลิง จุดวาบไฟ จุดไหลเท เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า นักวิจัยบางส่วนได้กล่าวถึงปริมาณกรดไขมันอิสระ และองค์ประกอบทางเคมีของไบโอดีเซลว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซล ด้วยเหตุนี้ จึงมีข้อกำหนดในการตรวจวัดคุณสมบัติของไบโอดีเซลขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN14214 ซึ่งเป็นมาตรฐานโดยทั่วไปสำหรับไบโอดีเซลที่จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ดังตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลจากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลจะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล (E et al., 2017)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ผลิตจากวัตถุดิบต่าง ๆ (E et al., 2017)

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	ประเภทของวัตถุดิบ			
	น้ำมันละหุ่ง	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันสบู่ดำ
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg)	37.6	37.2 - 39.9	37.3 - 39.7	42.67
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	928.7	870 - 878	855 - 914	873
ความหนืด (mm <sup>2</sup> /s)	16.67	4.50 - 5.11	4.06 - 39.5	4.23
จำนวนซีเทน	48.9	50.0 - 62.0	37.0 - 51.3	-
จุดไหลเท (°C)	-	8	-	4.2
จุดวาบไฟ (°C)	-	173	69 - 163	148
จุดติดไฟ (°C)	-	182	-	-
จุดขุ่น (°C)	-	14	-	10.2

ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography : GC) พบว่า มีกรดไขมันหลักที่พบในไบโอดีเซลจากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ คือ กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก กรดปาล์มติก กรดสเตียริก กรดริซิโนเลอิก กรดปาล์มโทเลอิก และกรดลิโนเลนิก เป็นต้น ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของกรดไขมันในไบโอดีเซล (E et al., 2017; Mubofu, 2016)

กรดไขมัน	น้ำมันละหุ่ง	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันสบู่ดำ
กรดโอเรอิก (C18:1)	3.00	38.60	21.27 - 23.26	41.62 - 49.39
กรดลิโนเลอิก (C18:2)	4.20	6.60	53.70 - 55.53	33.00 - 36.99
กรดปาล์มติก (C16:0)	1.00	49.80	11.70 - 11.75	13.23 - 16.00
กรดสเตียริก (C18:0)	1.00	2.90	3.15 - 3.97	5.40 - 7.00
กรดปาล์มโทเลอิก (C18:1)	-	-	-	0.85
กรดลิโนเลนิก (C18:3)	0.30	0.40	6.31 - 8.12	0.22 > 0.80
กรดอะราซิดิก (C20:0)	-	-	1.23	0.20
กรดมาจริก (C17:0)	-	-	-	0.10
กรดไมริสติก (C14:0)	-	1.10	-	-
กรดลอริก (C12:0)	-	0.20	-	-
กรดริซิโนเลอิก (C18:1 OH)	89.50	-	-	-
กรดไดไฮดรอกซีสเตียริก	0.70	-	-	-



### 1) สมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการบ่งชี้สมรรถนะของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ได้แก่ กำลังเบรก ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก จากผลการวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยใช้ไบโอดีเซลจากแหล่งวัตถุดิบต่าง ๆ ผสมกับน้ำมันดีเซล โดย Muralidharan and Vasudevan (2011) พบว่า ให้เป็นน้ำมัน B20, B40, B60, B80 ใช้รอบความเร็วทดสอบ 1500 RPM ที่อัตราส่วนการอัด 21 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด B40 เท่ากับ 38.46% ที่โหลดสูงสุด และสูงกว่าน้ำมันดีเซล 4.1% การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มโหลด ในส่วนผสม B20 และ B40 ที่โหลดสูงสุดมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอยู่ที่ 3.8050 kg/kWh และ 3.8817 kg/kWh ตามลำดับ และ Sivaramakrishnan (2017) ได้ศึกษาสมรรถนะและการปล่อยไอเสีย ของเครื่องยนต์สูบเดี่ยวที่อัตราส่วนการอัด 15:1, 16:1, 17:1 และ 18:1 โดยทดสอบกับน้ำมัน Karanja ผสมกับน้ำมันดีเซล B20, B25 และ B30 จากการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วนการอัด 18:1 การผสมน้ำมัน Karanja 25% กับน้ำมันดีเซลมีความเหมาะสมในการทำงาน โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด โดยพบว่ามีค่าสูงสุดที่ 30.46% สำหรับ B25 ที่โหลดสูงสุด อัตราส่วนการอัด 18 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลแล้วสูงกว่า 5% ซึ่งสอดคล้องกับ Can, Öztürk et al. (2017) ได้ศึกษาการผสมน้ำมันคาโนลาไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลที่สัดส่วน 5%, 10%, 15% และ 20% และทดสอบที่โหลด (4.8, 3.6, 2.4 และ 1.2 บาร์ BMEP) กับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว ผลการทดลองพบว่าการผสมคาโนลาไบโอดีเซลช่วยลด Ignition delay เนื่องจากค่าซีเซนที่สูงกว่า และมีสารอะโรมาติกที่ต่ำ การปลดปล่อยค่าความร้อนพบว่า น้ำมันที่มีอัตราส่วนผสมของคาโนลาจะมีการปลดปล่อยความร้อนที่ต่ำกว่า เนื่องจากค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าของน้ำมันไบโอดีเซล ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง 4.2% และค่า BSFC เพิ่มขึ้น 6.56% ทั้งนี้ หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของไบโอดีเซลพบว่า มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งมีสาเหตุจากคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล รวมถึงความหนาแน่นและความหนืดมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ส่งผลให้การกระจายตัวเป็นละอองฝอยได้ไม่ดี (Nantha Gopal et al., 2014)

### 2) การปล่อยมลพิษจำเพาะและครรชนีมลพิษ

ในการทำงานของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในจะมีการปล่อยไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศออกมาจากเครื่องยนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบที่ถือว่าเป็นมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ และฝุ่นละออง (Particulate) ความเข้มข้นของแก๊สที่เป็นมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์

มักจะถูกวัดเป็นส่วนในล้านส่วน หรือร้อยละในปริมาตร แต่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะพิจารณาเป็น 2 ลักษณะคือ อัตราการไหลของมวลมลพิษต่อหน่วยกำลังที่ให้ออกมา เรียกว่า “การปล่อยมลพิษจำเพาะ” อีกลักษณะหนึ่งก็คือ อัตราการไหลของมวลมลพิษต่อหน่วยอัตราไหลของเชื้อเพลิงที่เรียกว่า “ครรชณิการปล่อยมลพิษ”

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงเป็นสารที่มีพลังงานเคมีอยู่ในตัวเองและสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีให้กลายเป็นรูปความร้อนได้ โดยผ่านกระบวนการเผาไหม้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจน ผลที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้ทั้งเชื้อเพลิงและออกซิเจนจัดรวมตัวกันใหม่กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้และผลพลอยได้ คือความร้อนและแสงสว่างที่สามารถมองเห็นได้ในรูปแบบของเปลวไฟ แสดงสมการการเผาไหม้ได้ดังสมการที่ 2.15

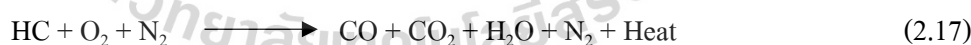


และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์แบ่งออกได้ ดังนี้

- 1) การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ



- 2) การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ



### 2.6.5 การเกิดมลพิษในเครื่องยนต์

การเกิดมลพิษในเครื่องยนต์ โดยทั่วไปแบ่งได้ดังนี้

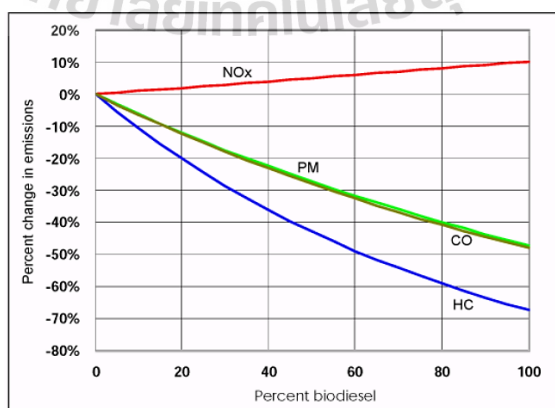
- 1) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดเนื่องจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ โดยทั่วไปเกิดจากการมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ นอกจากนี้สามารถเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น เกิดการมีส่วนผสมบาง เกิดจากการดับของเปลวไฟขณะกระบวนการเผาไหม้เนื่องจากไอดีที่อยู่บริเวณติดกับผนังห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิต่ำ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งเกิดจากการจ่ายน้ำมันเข้าห้องเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดจากการที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็น

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เมื่อเพิ่มออกซิเจนเข้าไปในกระบวนการแต่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้หมด

2) ไฮโดรคาร์บอน (HC) เป็นแก๊สที่สามารถติดไฟได้เนื่องจากไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นธาตุที่ติดไฟ เมื่อเกิดการเผาไหม้ไม่หมดจึงเหลือเชื้อเพลิง (ไฮโดรคาร์บอน) ปนออกมา กับไอเสีย ซึ่งการเกิดแก๊สดังกล่าวมีหลายสาเหตุคือเกิดจากอากาศมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการสันดาปเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ จึงเหลือเชื้อเพลิงบางส่วนที่ไม่เผาไหม้เกิดจากสัดส่วนหรืออัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันกับอากาศไม่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมหนาหรือส่วนผสมบาง เพราะส่วนผสมหนาจะทำให้ออกซิเจนที่ใช้ในการสันดาปไม่เพียงพอเชื้อเพลิงจึงเผาไหม้ไม่หมด ในขณะที่ส่วนผสมบางจะทำให้การแพร่กระจายของเปลวไฟลดลง ทำให้ส่วนผสมบางส่วนเผาไหม้ไม่ทันและเหลือมากับไอเสีย อีกทั้งยังเกิดจากส่วนผสมบางส่วนหลุดปนออกไปกับไอเสียในจังหวะที่ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียเปิดเหลื่อมกัน (Overlap) หรืออาจเกิดจากไอดีที่ติดกับผนังกระบอกสูบทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างไอดีและผนังกระบอกสูบเกิดขึ้นมากเกินไป

3) ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) เกิดจากการสันดาปในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง หมายความว่า ถ้ามีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะเกิดไนโตรเจนออกไซด์มาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดได้นั้นต้องมีปัจจัยอยู่ 2 อย่าง คือ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับอัตราส่วนผสมที่ระดับต่าง ๆ กัน จะมีผลทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

4) คิว้นขาว (Smoke opacity) คือ สารไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำมัน เชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้แล้วถูกปล่อยออกมาทางไอเสีย



รูปที่ 2.25 ผลกระทบการปล่อยมลพิษเฉลี่ยของไบโอดีเซล (Stephen R.Turns, 2012)

ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา โดยน้ำมัน Karanja ผสมกับดีเซล B20, B25, B30 จากการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วนการอัด 18:1 การผสมน้ำมัน Karanja 25% กับน้ำมันดีเซล มีความเหมาะสมในการทำงานพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซล Karanja ช่วยลด CO, HC แต่ NO<sub>x</sub> เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (Ozsezen et al, 2009) ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณออกซิเจนที่มากกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ไบโอดีเซลมีปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ต่ำ (Hasan and Rahman, 2017) เช่นเดียวกันกับคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยนักวิจัยรายงานว่า คุณสมบัติของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณออกซิเจนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ปริมาณการปล่อยมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และเมื่อพิจารณาฝุ่นละอองเห็นได้ว่า การใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลจะช่วยลดฝุ่นละอองเมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล Rakopoulos et al. (2006) ได้ศึกษาคุณลักษณะมลพิษของไบโอดีเซลบริสุทธิ์และไบโอดีเซลผสมน้ำมันดีเซลพบว่า ไบโอดีเซลมีฝุ่นละอองปริมาณต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซล

ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลจะส่งผลให้ปริมาณมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจนมากขึ้น (Can, Öztürk et al, 2017) พบว่า น้ำมันคาโนลา B20 มีการปลดปล่อยมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 8.9% ในส่วน CO<sub>2</sub> มีการปล่อยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 5.49% ซึ่งโหลด ความเร็วของเครื่องยนต์ ปริมาณออกซิเจน และจำนวนซีเทนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล และการเผาไหม้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนของไบโอดีเซล (Hasan and Rahman, 2017)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bharadwaz, Rao et al. 2016 ได้ศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะของไบโอดีเซล ในเครื่องยนต์ที่ปรับอัตราส่วนการอัดได้ (VCR) โดยใช้พารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมที่สุด สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และพารามิเตอร์ในการดำเนินงาน เช่น การปรับอัตราส่วนการอัด สัดส่วนผสมน้ำมันและภาวะโหลดต่าง ๆ ในขณะที่พารามิเตอร์สมรรถนะที่สนใจ เช่น ประสิทธิภาพการเชิงความร้อนด้วยเบรค (BTH) และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉพาะเจาะจงของเบรค (BSFC) และพารามิเตอร์การปล่อยเช่นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีการเผาไหม้ (HC), ไนตริกออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และควัน การทดลองดำเนินการตามการออกแบบการทดลองของวิธีการตอบสนองผิว การเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ การปฏิบัติงานของเครื่องยนต์จะดำเนินการ โดยใช้ Derringers Desirability approach จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เครื่องยนต์ VCR มีสมรรถนะสูงสุดและการปล่อยไอเสียต่ำสุดที่อัตราส่วน

การบีบอัดตัว 18 อัตราส่วนการผสมน้ำมันเชื้อเพลิง 5% ที่ภาระโหลด 9.03 กิโลกรัม ในแง่ของสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดของเครื่องยนต์การตอบสนอง เช่น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก 31.95% การสิ้นเปลืองน้ำมันเบรกเฉพาะ 0.37 กิโลกรัม / กิโลวัตต์ชั่วโมง คาร์บอนมอนอกไซด์ 0.036% สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีการเผาไหม้ 5 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 531.23 ppm และควันทันเท่ากับ 15.35% จากการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และข้อมูลการทดลองพบว่า การผสมด้วยไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพสูงสุดและการปล่อยไอเสียต่ำสุดตามพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่เหมาะสม

Bora and Saha 2016 ได้ศึกษาผลของการปรับอัตราการอัดตัวต่อสมรรถนะการเผาไหม้และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของไบโอดีเซลรำข้าวและไบโอแก๊ส สำหรับการทดลองใช้เครื่องยนต์ดีเซลแบบเชื้อเพลิงผสม 1 ลูกสูบ แบบฉีดตรง (DI), เครื่องยนต์ดีเซลไร้ระบบอัดอากาศ (NA), เครื่องยนต์ดีเซลที่ผ่านการระบายความร้อนด้วยน้ำ, สามารถปรับอัตราส่วนแรงอัดที่บีบอัดได้ (VCR) การทดลองดำเนินการทดลองด้วยอัตราการบีบอัด (CR) ที่แตกต่างกันคือ 18, 17.5 และ 17 และคงที่เวลาการฉีดที่ 23 องศา ก่อนจุดศูนย์ตายบน ภายใต้สภาพโหลดที่แตกต่างกันเมื่อใช้โหลดเต็มที่มีประสิทธิภาพการเบรกด้วยเบรก (BTEs) ภายใต้โหมดเชื้อเพลิงแบบคู่ (DFM) มีค่าเท่ากับ 20.27% ที่ CR18 19.97% ที่ CR17.5 และ 18.39% ที่ CR17 สำหรับสภาพการบรรทุกเดียวกัน การเปลี่ยนเชื้อเพลิงเหลว (LFR) สูงสุดเท่ากับ 80% ที่ CR18 79% ที่ CR17.5 และ 78.2% ที่ CR17 โดยเฉลี่ยแล้วมีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนลง 17.67% และ 17.18% เมื่อ CR เพิ่มขึ้นจาก 17 เป็น 18 แต่สำหรับการตั้งค่า CR เดียวกันจะมีการเพิ่มออกไซด์ของไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ 42.85% และ 14.13% ตามลำดับ และพบว่า อัตราส่วนการอัดของ 18 มีประสิทธิภาพในการเบรกสูงสุด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดคือ 20.27% ในโหมดเชื้อเพลิงคู่ การเปลี่ยนเชื้อเพลิงเหลวสูงสุดที่ 80% ได้จากอัตราส่วนการอัดของ 18 CO จะลดลง 17.67% โดยมีอัตราส่วนการอัดขึ้นจาก 17 เป็น 18 HC จะลดลง 17.18% ด้วยอัตราการบีบอัดที่เพิ่มขึ้นจาก 17 เป็น 18

Can, Öztürk et al. 2017 ได้ศึกษาการผสมน้ำมันคาโนลาไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลที่สัดส่วน 5%, 10%, 15% และ 20% และทดสอบที่โหลด (4.8, 3.6, 2.4 และ 1.2 บาร์ BMEP) กับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ผลการทดลองพบว่า การผสมคาโนลาไบโอดีเซลช่วยลด Ignition delay เนื่องจากจากค่าซีเซนที่สูงกว่าและมีสารอะโรมาติกที่ต่ำ การปลดปล่อยค่าความร้อน พบว่าน้ำมันที่มีอัตราส่วนผสมของคาโนลาจะมีการปลดปล่อยความร้อนที่ต่ำกว่า เนื่องจากค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าของน้ำมันไบโอดีเซล ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง 4.2% และค่า BSFC เพิ่มขึ้น 6.56% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมคาโนลา 20% ที่โหลดสูงสุด ในส่วนของการปลดปล่อยไอเสีย

พบว่า น้ำมันคาโนลา B20 ช่วยลดการปล่อย CO 32%, HC 30.3% และ Smoke 53.5% ที่โหลดสูงสุด แต่ในส่วนของ NO<sub>x</sub> มีการปล่อยเพิ่มขึ้น 8.9% ในส่วน CO<sub>2</sub> มีการปล่อยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 5.49%

Chhabra, Sharma et al. 2017 ได้ศึกษาผลกระทบของรำข้าวคืบและรำข้าวไบโอดีเซล ที่ผสมผสานกับน้ำมันดีเซล การตรวจสอบการทดลองแสดงรายละเอียดของขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล การประเมินสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ รวมทั้งศึกษาผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของปรับอัตราส่วนการอัด (CR) ของเครื่องยนต์แบบอัดระเบิด โดยใช้เชื้อเพลิงผสมกับไบโอดีเซล เพื่อหาค่า CR สูงสุดของเครื่องยนต์การทดลองได้ดำเนินการที่ CR ต่างกันตั้งแต่ 12 ถึง 18 จากนั้นทำการทดลองโดยใช้ B10, B20 และ B40 ผสมน้ำมันรำข้าวคืบและไบโอดีเซลที่ระดับ CR 12 และ 14 และผลลัพธ์เหล่านี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลแบบเดิม ในทำนองเดียวกันได้มีการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ระดับ B10, B20 และ B40 จากการทดลองพบว่าการผสมน้ำมันรำข้าวคืบไบโอดีเซลสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล

Dubey and Gupta (2018) ได้ศึกษาเชื้อเพลิงชีวภาพแบบคู่ (ไบโอดีเซลสบู่ดำและน้ำมันสน) ทดสอบกับเครื่องยนต์สูบเดียว ที่สามารถปรับค่าอัตราส่วนการอัด (15.5:1, 17:1, 18.5:1, 20:1) พบว่า น้ำมัน JBT50 มีการทำงานของเครื่องยนต์ที่ราบเรียบโดยไม่ต้องปรับแต่งใด ๆ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (BTE) ของ JBT50 สูงกว่าของดีเซลมาตรฐาน ที่โหลดสูงสุด เนื่องมาจากน้ำมัน JBT50 (สบู่ดำ 50% น้ำมันสน 50%) น้ำมันสนมีค่าความร้อนที่สูงถึง 4.44 MJ/kg เมื่อนำมาผสมกับน้ำมันไบโอดีเซลสบู่ดำจึงทำให้มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับดีเซลและค่าซีเทนที่สูง จึงทำให้น้ำมันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด พบว่า BTE เพิ่มสูงขึ้น JBT50 ที่อัตราส่วนการอัด 20 ที่โหลดสูงสุด พบว่า มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าน้ำมันดีเซลมาตรฐาน 2.17% CO ลดลง 13.04 % HC ลดลง 17.5% NO<sub>x</sub> ลดลง 4.21% CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น 11.04%

Dueso, Muñoz et al. (2018) ได้ศึกษาไบโอดีเซลจากดอกทานตะวันในเครื่องยนต์ดีเซล และได้รับสารเติมแต่งต่อต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติที่ผลิตจากการสกัดน้ำมันไบโอออย (ปริมาณสารประกอบ 1.9% โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล) ได้มีการประเมินผลกระทบของสารเติมแต่งทั้งในด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์และปริมาณการปล่อยก๊าซที่ผลิตได้ ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงอีก 5 ชนิด เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบ ได้แก่ น้ำมันดีเซลปิโตรเลียม น้ำมันไบโอดีเซลดอกทานตะวันที่ไม่มีสารเติมแต่ง ไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ ไบโอดีเซลที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ผสม B10 และไบโอดีเซลดอกทานตะวันที่ผสมน้ำมันดีเซล พลังงานเบรคพบว่า มีความคล้ายคลึงกันสำหรับ

เชื้อเพลิง 6 ชนิด ในขณะที่ BSFC และ BTE สูงกว่าสำหรับเชื้อเพลิงไบโอดีเซล สำหรับ The doped biodiesel และ The neat one มีเพียงความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ( $< 1\%$ ) แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของเครื่องยนต์การปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  และ  $\text{CO}_2$  สูงขึ้น สำหรับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลขณะที่ CO และควันลดลงในกรณีดังกล่าว การผสมผสานสารเติมแต่งจากน้ำมันไบโอดีเซลช่วยลดการปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  3.0% และควัน 4.4% เมื่อเทียบกับไบโอดีเซลที่มีส่วนผสมสารเติมแต่ง ในขณะที่การปล่อยก๊าซ CO และ HC เพิ่มขึ้น 0.7 และ 14.3% ตามลำดับ ค่ายังคงอยู่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

Madiwale, Karthikeyan et al. (2018) ได้ศึกษาการเติมเอทานอลเป็นสารเติมแต่งในการผสมไบโอดีเซลกับดีเซล ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องยนต์และลดการปล่อยไอเสียที่เป็นอันตรายได้ ในการทดลองครั้งนี้เอทานอลจะถูกเพิ่มเอทานอลให้กับไบโอดีเซลสบู่ดำ ถั่วเหลือง ปาล์ม และเมล็ดฝ้าย โดยเติมเอทานอลไป 5% โดยปริมาตร คุณสมบัติถูกตรวจสอบตามมาตรฐาน IS 1448 การสืบสวนรายงานว่า การเติมเอทานอลเป็นสารเติมแต่งช่วยลดความหนืดของการไหล, จุดแข็งตัวและจุดเทของไบโอดีเซลผสม เชื้อเพลิงทดสอบ B20E5 (ไบโอดีเซล 20% + น้ำมันดีเซล 75% และเอทานอล 5%) ของไบโอดีเซลสบู่ดำ ถั่วเหลือง ปาล์ม และเมล็ดฝ้ายไบโอดีเซลจะถูกทดสอบด้วยเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ เครื่องยนต์แบบสี่จังหวะ VCR (Variable Compression Ratio) และใช้เครื่องวัดภาระสำหรับสภาวะโหลดต่าง ๆ เพื่อประเมินการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตรวจสอบพบว่าการปรับปรุง BP, การใช้เชื้อเพลิง BSFC เพิ่มขึ้น และ BTE ที่เพิ่มขึ้นสำหรับการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากสบู่ดำ, ถั่วเหลือง, ปาล์ม และเมล็ดฝ้ายผสมสารเติมแต่งเอทานอล

Muralidharan and Vasudevan (2011) ได้ทดลองศึกษาสมรรถนะการเผาไหม้และการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ สูบเดี่ยว ที่มีปรับค่าอัตราส่วนการอัดได้ น้ำมันที่ใช้ทดลองสอบเป็นน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจาก น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว น้ำไปผสมกับน้ำมันดีเซล ให้เป็นน้ำมัน B20, B40, B60 และ B80 ใช้รอบความเร็วทดสอบ 1,500 RPM ที่อัตราส่วนการอัด 21 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด B40 เท่ากับ 38.46% ที่โหลดสูงสุด และสูงกว่าน้ำมันดีเซล 4.1% การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มโหลด ในส่วนผสม B20 และ B40 ที่ full load มีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอยู่ที่ 3.8050 kg/kWh และ 3.8817 kg/kWh ตามลำดับ แต่ทว่าน้ำมันดีเซลมีค่า 3.9758 kg/kWh. ซึ่งสิ้นเปลืองสูงกว่า ในการปล่อยก๊าซ HC พบว่าน้ำมันไบโอดีเซลมีการปลดปล่อยที่สูงกว่า ยกเว้น B20 ที่โหลดสูงกว่า ในการปล่อยก๊าซ  $\text{NO}_x$  พบว่า น้ำมันไบโอดีเซลมีการปล่อยที่สูงกว่า ยกเว้น B40 ที่โหลดต่ำ ในการปล่อย CO พบว่า B40 มีการปล่อยที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และ

สูงกว่าในโหลดต่ำและปานกลาง B40 ได้ให้การเผาไหม้ที่ได้รับความดันสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน

Sivaramakrishnan (2017) ได้ศึกษาสมรรถนะและการปล่อยไอเสีย ของเครื่องยนต์สูบเดี่ยว ที่อัตราส่วนการอัด 15:1, 16:1, 17:1 และ 18:1 โดยทดสอบกับน้ำมัน Karanja ผสมกับดีเซล B20, B25 และ B30 จากการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วนการอัด 18:1 การผสมน้ำมัน Karanja 25% กับน้ำมันดีเซลมีความเหมาะสมในการทำงาน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด โดยพบว่ามีค่าสูงสุด 30.46% สำหรับ B25 ที่โหลดสูงสุด อัตราส่วนการอัด 18 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลแล้วสูงกว่า 5% ในด้านการปล่อยไอเสีย พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด มีแนวโน้มในการปล่อย  $\text{NO}_x$  เพิ่มขึ้น  $\text{CO}_2$  เพิ่มขึ้น HC ลดลง การเพิ่มอัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซล Karanja ช่วยลด CO, HC แต่  $\text{NO}_x$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

M. Suresh , C.P. Jawahar, Arun Richard (2016) ได้กล่าวถึงการประเมินการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ไม่ได้บริโภค เช่น น้ำมันทอด น้ำมันไฟโรไลซิส น้ำมันปาล์มที่ผ่านการทำความร้อนก่อนน้ำมันที่ใช้ในการทำอาหารขยะ น้ำมันสบู่ดำ น้ำมัน Karanja เป็นต้น นอกจากนี้ยังศึกษาดัชนีในการวัดการเผาไหม้, สมรรถนะและลักษณะการปล่อยไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซลแบบบีบอัดตัวแปรบีบอัด (VCR) ซึ่งใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลกับเครื่องยนต์ปรับอัตราส่วนการอัด (VCR) ให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ลดการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงลงได้ถึง 30% การเสถียรที่ดียิ่งขึ้นของความดันในกระบอก ความสามารถในการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดและลดการปล่อยไอเสียเมื่อเทียบกับของ เครื่องยนต์ดีเซลอัตราการบีบอัดคงที่

Tripathi and Subramanian (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล (B100) ต่อระยะการพ่น และการสึกหรอของผนัง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ของเครื่องยนต์จุดระเบิดแบบบีบอัดด้วยเครื่องยนต์มีกำลังให้กำลังสูงสุดที่ 5.9 กิโลวัตต์ การคาดคะเนการแพร่กระจายของสเปรย์และความน่าจะเป็นของการสึกหรอของผนังของการใช้เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซลโดยคุณสมบัติน้ำมันที่การเผาไหม้และการฉีดที่ให้ความดันสูงสุดและสภาวะที่มีกำลังสูงสุด มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการสึกหรอของผนังของการฉีดไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากผลของอัตราส่วนการอัดที่เพิ่มขึ้น (21:1) และระยะเวลาในการฉีดที่เลื่อนไป (โดย 2.5° CA และ 5° CA) และในกรณีการรวมกันของการเพิ่มอัตราส่วนการอัดที่ (21:1) รวมกับ EGR (10% และ 20%) การฉีดที่ทำให้เกิดการปะทะกันของผนังจะได้รับการศึกษาอย่างละเอียด โดยใช้เทคนิคเหล่านี้ เช่น การหน่วงเวลาในการฉีดเพิ่ม อัตราการอัด การหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (EGR) อาจลดผลกระทบของการกระแทกของผนังได้อย่างไรก็ตาม เทคนิคเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อน และการปล่อย  $\text{NO}_x$  ในทางลบ



ระยะเวลาในการฉีดที่ลดลง โดย  $2.5^{\circ}$  CA ช่วยลดการชนกับผนังได้เนื่องจากความดันในกระบอกสูบลดลง ผลรวมของอัตราส่วนการอัด (21:1) และ EGR (20%) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดของการชนของผนัง เนื่องจากความหนาแน่นสูงขึ้นจากอัตราส่วนการอัดสูงขึ้น เทคนิคนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและการปล่อย  $\text{NO}_x$  และสรุปการทดลองหลัก ๆ ได้ดังนี้ ระยะการสึกหรอของการสเปรย์สำหรับไบโอดีเซลในน้ำมันปาล์มสูงกว่าน้ำมันดีเซล การเพิ่มระยะเวลาหน่วง (RT) และ EGR ลดการเกิด  $\text{NO}_x$  แต่มีประสิทธิภาพต่ำลง อัตราการบีบอัดที่เพิ่มขึ้น (CR) ช่วยลดการชนของผนังและประสิทธิภาพที่ดีขึ้น การเพิ่มระยะเวลาหน่วง(RT) รวม, EGR, CR ลด  $\text{NO}_x$  โดยไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ

Zareh, Zare et al. (2017) ได้ทำการศึกษานี้ไบโอดีเซลน้ำมันละหุ่ง (CAB), ไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าว (COB) และไบโอดีเซลน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว (WCB) ที่ผลิตโดยวิธีการ Transesterification และผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลธรรมดา (CDF) อัตราส่วนการผสมปริมาตรของไบโอดีเซลที่มีค่า CDF อยู่ที่ 5, 10, 20 และ 30 การทดสอบได้ดำเนินการภายใต้โหลดและความเร็วที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษไอเสียลักษณะเฉพาะกับความเร็วหรือภาระได้รับการตรวจสอบในเครื่องยนต์จุดระเบิดแบบบีบอัดค่าความหนืดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันความยาวของห่วงโซ่ไฮโดรคาร์บอนหมายเลขซีเทน ปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงความเร็วเครื่องยนต์โหลดถูกพิจารณาแยกกัน เพื่อพิจารณาผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ในการศึกษานี้ได้ดีขึ้นและเปรียบเทียบในห้องปฏิบัติการที่คล้ายคลึงกัน เงื่อนไขขึ้นอยู่กับผลกระทบหลักของโหลดและความเร็วของเครื่องยนต์ในการปล่อยมลพิษไอเสีย และสมรรถนะของเครื่องยนต์ การศึกษานี้ทั้งสองแบบนี้ได้รับการพิจารณาพร้อม ๆ กัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะและการปล่อยก๊าซที่ดีที่สุดคือ การผสมไบโอดีเซลน้ำมันปรุงอาหาร(WCB) และ ไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าว (COB) ตามลำดับ

วัฒนา ปิ่นเสมอ, นพวรรณ ชนัญพานิช (2013) งานวิจัยนี้เน้นถึงการผลิตไบโอดีเซลเกรดชุมชนแบบประหยัดจากน้ำมันมะพร้าวซึ่งมีกรดไขมันอิสระ  $11.5 \pm 0.5\%$  โดยใช้เทคนิคการผลิตแบบสองขั้นตอนที่ใช้กรดตามด้วยเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน เร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  จำนวน 2% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 เป็น เวลา 4 ชั่วโมง พบว่า การใช้กรด  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  เพิ่มขึ้นมากกว่า 2% โดยน้ำหนัก ไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อการลดกรดไขมันอิสระกรดไขมันอิสระยังคงลดเท่าเดิมเมื่อเทียบกับการเพิ่มของกรด  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  ขั้นตอนที่สองเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมัน จากขั้นตอนแรกโดยใช้อัตราส่วน โมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่าเดิม และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น NaOH ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ในสภาวะอุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 86% (CB) ที่เตรียมได้มีความหนืดเท่ากับ 3.2 cSt และจุดไหลเทเท่ากับ -5 องศาเซลเซียส ดังนั้นสามารถนำ CB ไปใช้ในพื้นที่ที่มีอากาศเย็นหรือผสมกับไบโอดีเซลจากน้ำมันชนิดอื่น จากผลการศึกษานี้อาจสรุปได้ว่า ในการเตรียมไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวแบบใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น กรดไขมันอิสระในน้ำมันไม่ควรเกิน 4%



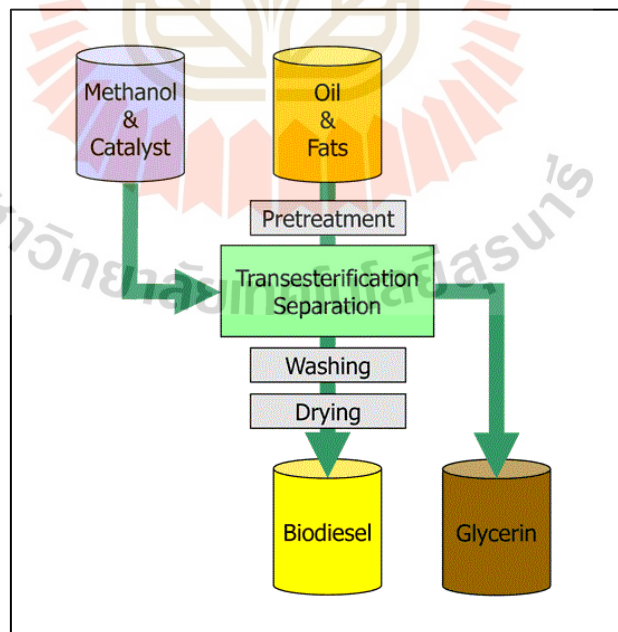
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนของหัวข้อนี้จะเป็นวิธีการดำเนินการวิจัย รวมทั้งวิธีการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ ทั้งวิธีการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม มะพร้าว และรำข้าว โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน การวัดคุณสมบัติของน้ำมันภายใต้มาตรฐาน ASTM รวมทั้งวิธีการวัดสมรรถนะ อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค และการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซล จากการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ โดยจะกล่าวถึงแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

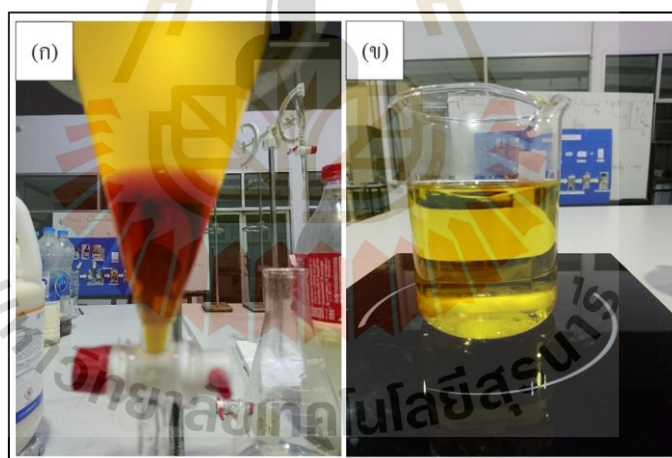
#### 3.1 การผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล คือ น้ำมันพืช และมีขั้นตอนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล คือ น้ำมันพืชซึ่งเป็นสารตั้งต้นน้ำหนัก 400 กรัม ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยกำหนดเงื่อนไขให้ใช้เมทานอล (Methanol) หนักร้อยละ 45 หรือ 45% ของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม ซึ่งเมทานอลจะมีน้ำหนัก 180 กรัม โดยอัตราส่วน โมล (Molar Ratio) ของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล คือ 1:12 หรือถ้าใช้น้ำมันปาล์ม 1 โมล จะต้องใช้เมทานอล 12 โมล ในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สมบูรณ์ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) น้ำหนักร้อยละ 2 หรือ 2% ของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม (8 กรัม) มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และในขั้นตอนการแยกชั้นของน้ำมันไบโอดีเซล และกลีเซอรอล (Glycerol) นั้น เมื่อเกิดการแยกชั้นน้ำมันไบโอดีเซลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า กลีเซอรอลจะลอยอยู่ด้านบนเหนือกลีเซอรอลสามารถมองเห็นการแยกชั้นได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 (ก) และขั้นตอนสุดท้ายหลังจากต้มไอน้ำออกจากน้ำมันไบโอดีเซลแล้วจะได้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 (ข)

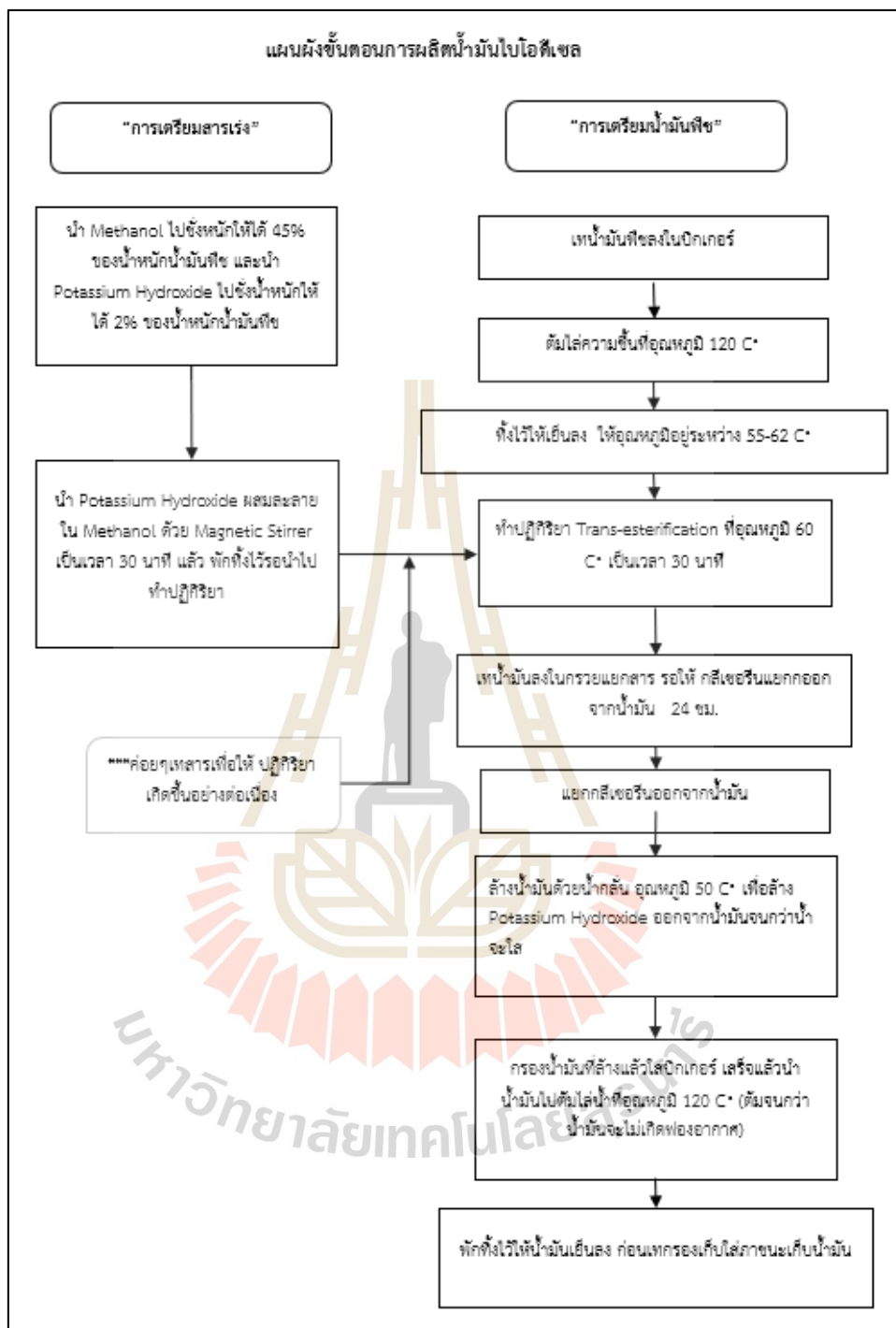


รูปที่ 3.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช

(ก) การแยกชั้นของน้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

(ข) น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช

วิธีการหรือขั้นตอนในการทำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช ซึ่งลำดับแรกจะแสดงให้เห็น ขั้นตอนในการทำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในภาพรวมโดยสังเขป ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช

จากรูปที่ 3.3 อธิบายรายละเอียดของขั้นตอนในการทำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชได้ดังต่อไปนี้

1) เตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช เช่น น้ำมันพืช ปีกเกอร์ ผ้าขาวบางสำหรับกรองน้ำมันหรือภาชนะสำหรับจัดเก็บน้ำมัน เป็นต้น

2) เทน้ำมันพืชลงในปีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

3) นำน้ำมันพืชที่เทลงในปีกเกอร์แล้ว ไปทำการต้มไล่ความชื้นด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งให้ทำการสังเกตน้ำมัน เมื่อน้ำมันเริ่มเป็นของเหลวทั้งหมดให้ใส่แม่เหล็กสำหรับการกวน น้ำมันให้อุณหภูมิน้ำมันมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยใช้ความเร็วในการกวนของเครื่องกวนสารที่ เบอร์ 2 หรือ 350 รอบต่อนาที

4) สังเกตฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการต้มไล่ความชื้นออกจากน้ำมัน ซึ่งขณะที่ต้ม น้ำมันนั้นฟองอากาศจะลอยขึ้นมาอยู่ที่บริเวณผิวของน้ำมัน โดยให้ทำการต้มน้ำมันไปเรื่อย ๆ จนกว่าฟองอากาศจะหมดไป นั่นหมายถึงน้ำหรือความชื้นจะระเหยออกจากน้ำมันจนหมดไป

5) เมื่อทำการต้มไล่ความชื้นเรียบร้อยแล้ว ให้นำน้ำมันพืชออกมาพักทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้น เมื่อน้ำมันเย็นลงแล้ว ให้ทำการกรองน้ำมันพืชใส่ปีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร อันใหม่

6) จากนั้นนำน้ำมันไปทำการชั่งน้ำหนัก เพื่อให้ได้สัดส่วนที่จะทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการนำปีกเกอร์อันใหม่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ไปชั่งที่เครื่องชั่งน้ำหนัก จากนั้น ให้ทำการกดเซตศูนย์ที่เครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วเทน้ำมันลงในปีกเกอร์ที่วางอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนัก เพื่อให้ได้น้ำมันในสัดส่วน หรือในน้ำหนักที่ต้องการที่จะนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

7) จากขั้นตอนที่ 6 นั้น ในขณะที่พักน้ำมันไว้ให้เย็น จะมีช่วงเวลาสำหรับขั้นตอน การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีวิธีการคือ นำเมทานอล ไปชั่งน้ำหนักให้ได้ 45% ของน้ำหนักน้ำมัน พืช และนำไปผสมไฮดรอกไซด์ไปชั่งน้ำหนักให้ได้ 2% ของน้ำหนักน้ำมันพืช ซึ่งในก่อนหน้า นี้จะต้องทราบแล้วว่า จะทำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชโดยใช้น้ำมันพืชในสัดส่วนเท่าใด เช่น ถ้าเตรียมน้ำมันไว้ที่ 400 กรัม จะต้องเตรียมเมทานอลที่ 180 กรัม และเตรียมไฮดรอกไซด์ ที่ 8 กรัม เป็นต้น

8) ผสมให้ไฮดรอกไซด์ละลายในเมทานอล โดยใช้ขวดทดลองรูปชมพูเป็น ภาชนะสำหรับใส่ทั้งเมทานอล และไฮดรอกไซด์ แล้วกวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวน สารที่ความเร็วเบอร์ 2 กวนสารจนกว่าไฮดรอกไซด์ละลายจนหมด และพักทิ้งไว้รอ นำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

9) ถึงขั้นตอนนี้แล้วทั้งน้ำมันและสารเร่งปฏิกิริยาจะถูกเตรียมไว้สำหรับทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเรียบร้อยแล้ว ซึ่งในลำดับถัดไปให้นำน้ำมันที่ชั่งน้ำหนักได้ตามสัดส่วนที่

ต้องการแล้วไปให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสาร และกวนน้ำมันที่ความเร็วรอบเบอร์ 2 และใช้เทอร์โมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ

10) ให้ความร้อนน้ำมันพืชจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิ 60 °C จากนั้นให้ทำการเทสารเร่งปฏิกิริยาลงไปในปีเกอร์น้ำมันที่กำลังถูกกวนอยู่บนเครื่องกวนสาร โดยค่อย ๆ เทสารเร่งปฏิกิริยาช้า ๆ โดยใช้เวลาประมาณ 1-3 นาที จนกระทั่งสารเร่งปฏิกิริยาหมด อุณหภูมิของน้ำมันจะลดลงมาที่ประมาณ 55 °C ทำการให้ความร้อนน้ำมันจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิกลับไป 60 °C จากนั้นทำการจับเวลาสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นเวลา 30 นาที

11) เมื่อทำปฏิกิริยาครบ 30 นาทีแล้ว ให้นำน้ำมันไปเทเก็บไว้ในกรวยแยกสาร ซึ่งเป็นกรวยสำหรับพักให้น้ำมันที่ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แล้วให้เกิดการแยกชั้นของน้ำมันไบโอดีเซล และกลีเซอรินออกจากกัน ซึ่งจะใช้เวลาแยกชั้นประมาณ 24 ชั่วโมง โดยที่น้ำมันไบโอดีเซลที่มีน้ำหนักเบาจะลอยอยู่ด้านบนเหนือกลีเซอรอลที่มีน้ำหนักมากกว่า น้ำมันไบโอดีเซลจะอยู่ด้านล่างและเห็นเป็นการแยกชั้นอย่างชัดเจน

12) หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมงแล้ว ให้ทำการแยกกลีเซอรินออกจากน้ำมันไบโอดีเซล โดยการเปิดจุกก๊อกด้านล่างของกรวยแยกสาร เพื่อให้กลีเซอรินไหลออกมาจนหมด ซึ่งก่อนที่จะแยกเอากลีเซอรินนั้นให้ทำการนำน้ำกลั่นใส่ปีเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสาร เพื่อใช้สำหรับการล้างน้ำมันไบโอดีเซลในขั้นตอนถัดไป

13) จากขั้นตอนที่ 12 เมื่อแยกกลีเซอรอลออกไปแล้ว น้ำกลั่นที่ถูกให้ความร้อนทิ้งไว้จะมีอุณหภูมิประมาณ 50 °C พอดี จากนั้นให้นำน้ำกลั่นมาทำการล้างน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อใช้น้ำกลั่นดิงโปรแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ยังเหลือค้างอยู่ออกไปให้หมด โดยค่อย ๆ ล้างและปล่อยน้ำออกที่จุกก๊อกด้านล่างกรวยแยกสาร น้ำกลั่นที่ใช้ล้างในรอบถัดไปมีลักษณะใส จึงหยุดทำการล้างน้ำมันไบโอดีเซล

14) ทำการกรองน้ำมันไบโอดีเซลหลังจากล้างเสร็จแล้วด้วยผ้าขาวบางใส่ในปีเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้มไล่ไอน้ำที่เหลือจากการล้างน้ำมันไบโอดีเซลออกให้หมดด้วยเครื่องกวนสารที่อุณหภูมิ 120 °C โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ และใช้ความเร็วในการกวนของเครื่องกวนสารที่เบอร์ 2

15) สังเกตฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขณะที่ต้มไล่ไอน้ำที่จะลอยขึ้นมาเกาะบริเวณผิวน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งทำการต้มไล่ไอน้ำไปจนกระทั่งฟองอากาศหายไปทั้งหมด จากนั้นนำน้ำมันที่ต้มไล่ไอน้ำแล้วมาพักทิ้งไว้ให้เย็น ก่อนที่จะเทกรองด้วยผ้าขาวบางอีก 1 ครั้ง ใสในภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บน้ำมัน และการเก็บน้ำมันควรเก็บไว้ในที่ที่ค่อนข้างมีแสงสว่างน้อย รวมทั้งไม่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมมาก ๆ เช่น ในตู้สำหรับจัดเก็บน้ำมันไบโอดีเซลโดยเฉพาะ เป็นต้น



รูปที่ 3.4 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

### 3.2 ขั้นตอนการผสมน้ำมันประเภทต่าง ๆ

ในบทนี้จะเป็นวิธีการหรือขั้นตอนในการผสมน้ำมันดีเซลกับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันทั้งน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้งหมด 3 ชนิด จากน้ำมันเพื่อใช้ในการผสมให้ได้เป็นน้ำมันในแต่ละประเภทที่ต้องการใช้ในการทดสอบ ดังตารางที่ 3.1 และมีขั้นตอนการผสมดังต่อไปนี้

1) เตรียมน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล รวมไปถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการผสมน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร, กระจกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร และ 100 มิลลิลิตร เป็นต้น

2) จากนั้นตวงน้ำมันดีเซลใส่กระจกตวงปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร รวมถึงตวงน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใส่กระจกตวงปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามสัดส่วน ดังตารางที่ 3.1 เพื่อให้ได้ประเภทน้ำมันที่จะผสมตามที่ต้องการ

3) เทน้ำมันที่ตวงแล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นนำน้ำมันไปกวนผสมด้วยเครื่องกวนสารที่เบอร์ 2 เป็นเวลา 30 นาที

4) เทน้ำมันที่ผสมเสร็จแล้วเก็บใส่ในภาชนะสำหรับจัดเก็บน้ำมัน



ตารางที่ 3.1 สัดส่วนในการผสมน้ำมันประเภทต่าง ๆ

ประเภทน้ำมัน	สัดส่วน (มิลลิเมตร)		
	Diesel (มล.)	Biodiesel (มล.)	รวมเป็น (มล.)
POB 20	800	200	1000
POB 40	600	400	1000
POB 100	0	1000	1000
COB 20	800	200	1000
COB 40	600	400	1000
COB 100	0	1000	1000
RBB 20	800	200	1000
RBB 40	600	400	1000
RBB 100	0	1000	1000

- หมายเหตุ POB คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม, SWB คือ ไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน, SBB คือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง, COB คือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว และ RBB คือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว



รูปที่ 3.5 ลักษณะของน้ำมันดีเซลที่ผสมเข้ากับน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วนต่าง ๆ

### 3.3 การทดสอบคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง

การทดสอบนี้เป็นการวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐาน American Society of Testing Material (ASTM) ดำเนินการทดสอบที่อาคารปฏิบัติการ 4 และ 5 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการทดสอบนี้ได้นำน้ำมันดีเซลซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลมีค่าเลขซีเทนอยู่ในช่วง 40-50 และน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดสอบคือ น้ำมันประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้รับความเห็นชอบการจำหน่ายหรือมีไว้เพื่อจำหน่ายไบโอดีเซลจากกรมธุรกิจพลังงาน และน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มในสัดส่วนต่าง ๆ ตามเงื่อนไขการเตรียมตัวอย่าง การเปรียบเทียบค่ากับคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลมีข้อกำหนดตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ฉบับที่ 5 พ.ศ. 2558 ในการศึกษารุ่นนี้ได้ทำการทดสอบวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมด 4 ลักษณะ คือ ความถ่วงจำเพาะ ดัชนีซีเทน กากถ่าน และการกลั่น ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบ ดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การทดสอบความหนืดของน้ำมันทดสอบ

การทดสอบความหนืดของน้ำมันทดสอบวัดได้ด้วยการใช้เครื่องมือ Viscosity-Kinematic Capillary Tempering Bath High Temperature Ref.-No:20-0150 (230V) 20-0151 (115V) การวัดและวิเคราะห์ความหนืดทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D445 ค่าที่วัดได้อยู่ในหน่วยเซนติสโตก (cSt) ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องอยู่ในสภาวะของเหลวทั้งหมด โดยความหนืดของน้ำมันทดสอบที่นำมาวิเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 300,000 cSt ระบบการวัดประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้หลอดแก้วรูเล็กสำหรับวิเคราะห์ความหนืด (Capillary Tube Viscosity) ขายึดหลอดแก้วรูเล็ก (Viscometer Holder) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิสำหรับวิเคราะห์ความหนืด (Viscometer Bath) นาฬิกาจับเวลา (Stop Watch) และจุกยาง ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) กรองน้ำมันทดสอบด้วยตะแกรงที่มีช่องเมสไม่เกิน 75  $\mu\text{m}$  เพื่อแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำมันทดสอบ ใช้กระบอกตวงขนาด 100 ml ตวงน้ำมันทดสอบที่ต้องการทดสอบปริมาตร 20 ml แล้วเติมน้ำมันทดสอบลงในหลอดแก้วรูเล็ก
- 2) จากนั้นนำหลอดแก้วรูเล็กประกอบกับขายึด และแช่ลงในอ่างน้ำ ที่ควบคุมอุณหภูมิสำหรับวัดความหนืดที่ตั้งค่าอุณหภูมิเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.6
- 3) แช่น้ำมันทดสอบทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำมันทดสอบมีอุณหภูมิเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยบันทึกอุณหภูมิของน้ำมันทดสอบก่อนแช่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดก่อนบรรจุน้ำมันทดสอบลงในหลอดรูเล็ก

4) ใช้หลอดตรวจสอบด้วยหลอดปิเปตดูดน้ำมันทดสอบให้สูงถึงระดับ A และเริ่มจับเวลาเมื่อของเหลวไหลลงมาถึงระดับ B และหยุดจับเวลาเมื่อของเหลวไหลลงมาถึงระดับ C บันทึกเวลาที่จับได้เป็นวินาที ดังรูปที่ 3.7

5) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4) อีกจำนวน 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่วัดได้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนืดของน้ำมันทดสอบที่ทำกรวิเคราะห์



รูปที่ 3.6 การประกอบหลอดแก้วรูเล็กกับขาหยัดและตั้งค่าอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการจับเวลาสำหรับวัดความหนืด

### 3.3.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของน้ำมันทดสอบได้วัดและทดสอบด้วยเครื่องมือ Density API & Specific Gravity-Tempering Bath Ref. - No: 26- 0017 (230V) 26- 0018 (115V) การดำเนินการทดสอบอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM D1298 ซึ่งได้ระบุความหนักเบาของน้ำมันทดสอบที่อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 15.6 องศาเซลเซียส ระบบการวัดประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ น้ำมันทดสอบเงื่อนไขการผสมต่าง ๆ ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) มีสเกลระดับ 0.007-1.000 มีความละเอียดเท่ากับ 0.005 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ครอบกวดวงขนาด 250 มิลลิเมตร จำนวน 4 ครอบอก และนาฬิกาจับเวลา (Stop Watch) ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 การจุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงในครอบกวดวง

- 1) เปิดเครื่องตั้งค่าอุณหภูมิอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 15.6 องศาเซลเซียส และรอจนกระทั่งได้อุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิทดสอบที่ตั้งไว้
- 2) กรองน้ำมันทดสอบด้วยตะแกรงที่มีช่องเมสขนาดไม่เกิน 75 ไมโครเมตร เพื่อแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำมันทดสอบ
- 3) เติมน้ำมันทดสอบที่ต้องการทดสอบลงในครอบกวดวงขนาด 250 ml พร้อมติดฉลากกำกับที่ครอบกวดวง
- 4) นำครอบกวดวงแช่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในอุณหภูมิทดสอบที่ 15.6 องศาเซลเซียส
- 5) นำไฮโดรมิเตอร์จุ่มลงไปในการครอบกวดวงแล้วปล่อยให้ลอย เมื่อไฮโดรมิเตอร์นิ่ง ทำการอ่านค่าและบันทึกผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.8
- 6) ทำการทดสอบตามข้อ 2) ถึงข้อ 5) ซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.3.3 การทดสอบการกลั่น

การทดสอบการกลั่นของน้ำมันทดสอบใช้เครื่องมือ Distillation at Atmospheric Pressure DU 4-Economy (manual) Ref. - No: 11-0904 (230V) 11-0905 (115V) ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D86 ระบบการวัดอุณหภูมิช่วงการกลั่นของสารจากพวกไฮโดรคาร์บอนนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ และวิธีการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.3.1 อุปกรณ์ทดสอบ

- 1) ชุดทดสอบวัดค่าอุณหภูมิของการกลั่น (Distillation) ดังรูปที่ 3.9
  - เครื่องให้ความร้อนแบบ Front-View
  - เครื่องหล่อเย็น (Cooling Bath R-Type)



รูปที่ 3.9 ชุดทดสอบค่าอุณหภูมิของการกลั่น

- 2) ขวดการกลั่น (Distillation Flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.9
- 3) อลูมิเนียมฟรอยด์
- 4) กระบอกตวง (Cylindrical) ขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน
- 5) นาฬิกาจับเวลา
- 6) เทอร์โมมิเตอร์สำหรับระบบการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM 9C/IP และเทอร์โมมิเตอร์สำหรับระบบหล่อเย็น (Thermometer for Cooling Bath) ดังรูปที่ 3.9
- 7) จุกยางซิลิโคน (Silicone Stopper) เพื่อปิดด้านบนของขวดการกลั่น
- 8) กรรไกรคีบขวดการกลั่น เนื่องจากหลังการกลั่นขวดการกลั่นมีอุณหภูมิสูงมากจึงต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึด

### 3.3.3.2 วิธีดำเนินการทดสอบ



รูปที่ 3.10 การให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบ Front-View

- 1) ตรวจสอบความสะอาดท่อหล่อเย็นด้วยการใช้เศษผ้าแห้งผุกดัดกับเส้นลวดเช็ดทำความสะอาด
- 2) ตวงน้ำมันทดสอบด้วยกระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร และเทลงในขวดการกลั่น
- 3) ประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ และปิดฝาขวดการกลั่น ต่อมาทำการประกอบอุปกรณ์หลัก โดยให้ตำแหน่งของเทอร์โมมิเตอร์นั้นติดตั้งที่ขวดการกลั่น และทำการติดตั้งที่เครื่องหล่อเย็น
- 4) ตั้งอุณหภูมิที่เครื่องหล่อเย็น
- 5) เริ่มให้ความร้อนด้วยเครื่องอบความร้อนแบบ Front-View โดยในช่วงเริ่มต้นให้ปรับความร้อนอยู่ที่ระดับ 5 ถึงระดับ 6
- 6) เมื่อน้ำมันทดลองในขวดกลั่นเริ่มเดือด ผู้ทำการทดสอบต้องคอยสังเกตเพื่อบันทึกอุณหภูมิที่น้ำมันทดสอบเกิดการกลั่นตัวออกมาเป็นหยดแรก โดยบันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดอยู่กับขวดการกลั่นอยู่ในช่วง 4-5 มิลลิลิตร
- 7) เริ่มจับเวลาและควบคุมการให้ความร้อนกับขวดกลั่น เพื่อกำหนดอัตราการกลั่นอยู่ในช่วง 4-5 มิลลิลิตรต่อนาที

8) บันทึกอุณหภูมิให้สัมพันธ์กับปริมาตรที่กลั่นได้ ส่วนใหญ่จะบันทึกอุณหภูมิที่กลั่นได้ทุก 10 มิลลิลิตร โดยกลั่นถึงร้อยละ 50 ของปริมาตร แล้วทำการเปรียบเทียบค่าการกลั่นที่ได้ของน้ำมันทดสอบกับค่าการกลั่นของน้ำมันดีเซล

9) ทำความสะอาดอุปกรณ์ทุกครั้งที่ทำกรทดลองเสร็จเพื่อความสะอาดในการทำการทดลองครั้งถัดไป

### 3.3.4 การทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิง

การทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิงใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “Bomb Calorimeter” รุ่น Bomb C5000 ในการดำเนินการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D240 ในการวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบไปด้วย



รูปที่ 3.11 เครื่องมือ Bomb Calorimeter รุ่น Bomb C5000

#### 3.3.4.1 อุปกรณ์ทดสอบ

1) เครื่องมือทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Bomb Calorimeter) ซึ่งในชุดประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ลูก Bomb วิเคราะห์ตัวอย่าง จำนวน 1 ลูก
- ถังบรรจุแก๊สออกซิเจนขนาด 6 กิโล แรงดัน 1,950 ปอนด์ จำนวน 1 ชุด
- หัวเจลดทอนความดันสำหรับแก๊สออกซิเจน จำนวน 1 ชุด
- โปรแกรม CALWIN SOFTWARE NETWORK CONNECTION เพื่อใช้ร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์

- หน้าจอแบบ LCD แสดงผลการทำงานของเครื่องวัดค่าความร้อนเชื้อเพลิง
  - เครื่อง Isoperibol Oxygen Bomb Calorimeter เป็นระบบที่ใช้ น้ำสองส่วนแยกกัน คือ สำหรับล้อมรอบลูกบอมบ์เพื่อรับการถ่ายเทความร้อน (Bucket) และส่วนป้องกันความร้อนจากภายนอก (Jacket)
  - ตัวกรองน้ำ
- 2) ค่ายสำหรับการจุดระเบิด (ใช้ 1 เส้น ต่อการทดสอบ 1 รอบ)
  - 3) คีมจับยึด จำนวน 2 อัน
  - 4) เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับทดสอบ
  - 5) หลอดหยดสาร
  - 6) ถังแก๊สออกซิเจน
  - 7) เครื่องชั่งสารดิจิตอลมีความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
  - 8) ถ้วยบรรจุสารสำหรับทดสอบ (ถ้วยจุดระเบิด)

#### 3.3.4.2 วิธีการใช้เครื่องมือทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิง

คอมพิวเตอร์

- 1) เชื่อมสายปลั๊กไฟเครื่องทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิงและเปิด
- 2) เปิดวาล์วออกซิเจน เครื่องมือนี้จะมีระบบเติมออกซิเจนอัตโนมัติ
- 3) เปิดตัวเครื่องมือทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิง และเปิดปุ่มทำความสะอาด
- 4) รอให้หน้าจอบนเครื่องมือทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิงขึ้นว่า Stable จึงสามารถทำการทดสอบได้
- 5) เปิดโปรแกรม CALWIN ในคอมพิวเตอร์
- 6) ทำการเลือก Setup > Setting > เลือกระบบการวัดผลที่ต้องการ > OK  
เลือกการวัดผลแบบ Isoperibol จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 22 นาที ซึ่งจะให้ค่าการวัดที่แม่นยำกว่าแบบ Adiabatic และ Dynamic
- 7) ทำการเลือก Setup > Setting > Calculation เพื่อใช้เลือกมาตรฐานการทดสอบ ต่อมาเลือกหน่วยที่จะแสดงค่าที่วัดได้ > OK ในการทดสอบ การทดสอบนี้ได้ใช้มาตรฐาน ASTM D240 และเลือกให้วิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงออกมาให้หน่วย MJ/kg
- 8) ทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง ด้วยการตวงน้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้หลอดหยดสาร บีบน้ำมันลงในภาชนะสำหรับใส่สาร ชั่งบนเครื่องชั่งดิจิตอลให้ได้ น้ำหนัก 0.25 กรัม



9) กดปุ่ม Printer ที่เครื่องซึ่ง โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างสำหรับการนำ  
น้ำหนักของตัวอย่างน้ำมันมาแสดงบนคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน จากนั้น คลิก  
OK บนคอมพิวเตอร์

10) ใช้เข็มดึงเส้นด้วยออกมา 1 เส้น แล้วมัดเส้นด้วยให้ติดกับขวด

11) นำถ้วยที่ใส่น้ำมันซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบวางลงบนแกนอลูมิเนียม  
ของชุดทดสอบ จากนั้นนำปลายของเส้นด้ายที่พันไว้จุ่มลงไปบนน้ำมันในถ้วยจุดระเบิด ซึ่งจะใช้  
เส้นด้ายเป็นเชื้อเพลิงเบื้องต้นสำหรับการเผาไหม้

12) ประกอบลูกบอมบ์ โดยการนำสิ่งที่เตรียมไว้บรรจุลงไปในกระบอก  
อลูมิเนียม จากนั้น ทำการกดลงให้สนิทแล้วหมุนเกลียวอลูมิเนียม

13) เมื่อประกอบลูกบอมบ์เสร็จแล้ว นำลูกบอมบ์เข้าไปติดตั้งในเครื่อง  
ทดสอบการวัดค่าความร้อนเชื้อเพลิง ควรใส่ลูกบอมบ์ในตำแหน่งที่ถูกต้องไม่เอียง ก่อนคลิกที่ Start  
ทุกครั้ง

14) เมื่อติดตั้งลูกบอมบ์เสร็จแล้วที่หน้าจอจะแสดงว่า “Vessel close  
safty?” “OK” แล้วคลิกที่ OK ที่หน้าจอแสดงผลของเครื่องมือทดสอบความร้อนเชื้อเพลิงหนึ่งครั้ง  
เพื่อทำการยืนยัน จากนั้นลูกบอมบ์บรรจุตัวอย่างน้ำมันจะเลื่อนลงไป Vessel ในตัวเครื่องทดสอบ  
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

15) จากนั้นกลับมาสั่งบน โปรแกรม CALWIN โดยทำการเลือก Status  
bar C5000 แล้วคลิกที่ Start เครื่องจะเริ่มทำงานทันที

16) การวัดค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะใช้เวลานานประมาณ 15-22 นาที  
เครื่องมือจะสามารถอ่านค่าความร้อนเชื้อเพลิงออกมาได้

17) เมื่อเครื่องมืออ่านค่าความร้อนเชื้อเพลิงเสร็จแล้ว ลูกบอมบ์จะ  
เคลื่อนที่ออกมาจาก Vessel จากนั้น ทำการถอดลูกบอมบ์ออกมาเช็ดทำความสะอาดให้แห้ง

18) ถ้าต้องการทำการทดสอบน้ำมันตัวอย่างอื่นต่อไป สามารถกลับไป  
ทำซ้ำได้ตามขั้นตอนก่อนหน้านี้

19) ก่อนปิดเครื่องมือทุกครั้ง ควรปิดโปรแกรม CALWIN ก่อน

20) ทำการปิดเครื่องมือ Bomb Calorimeter โดยทำการกด Exit ที่หน้าจอ  
แสดงผลก่อน แล้วจึงทำการปิดเครื่องมือที่ปุ่มด้านหน้า

21) ปิดเครื่อง Cooling Unit ที่ปุ่มด้านหน้าตัวเครื่อง

22) ขั้นตอนสุดท้าย ทำการปิดวาล์วถึงออกซิเจน

### 3.3.5 การหาค่าดัชนีซีเทน (Cetane Index)

1) การวัดค่าดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากว่า การวัดค่าซีเทนนัมเบอร์โดยตรงนั้น ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงต้องทำการหาค่าดัชนีซีเทนแทน เพื่อเป็นการประมาณค่าซีเทนนัมเบอร์โดยคร่าว ๆ ซึ่งการหาค่าดัชนีซีเทนนั้น จะมีคำนวณจากค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องภายใต้มาตรฐานของ American Society of Testing and Materials (ASTM) แต่จะเป็นมาตรฐานของการหาค่าดัชนีซีเทน ซึ่งก็คือ ASTM D976

โดยที่การหาค่าดัชนีซีเทนคำนวณได้จากความถ่วงจำเพาะ API และจุดเดือดค่ากลาง (Mid-Boiling Point) หรืออุณหภูมิของการกลั่นของน้ำมันตัวอย่างที่ร้อยละ 50 ของปริมาณน้ำมันตัวอย่าง ในขั้นตอนก่อนหน้าจะเป็นการวัดค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D1298 และการกลั่นที่ร้อยละ 50 ของตัวอย่างน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D86 ซึ่งเป็นค่าที่ทราบได้ เนื่องจากการวัดออกมาแล้ว จากคุณสมบัติความถ่วงจำเพาะและการกลั่นนั้น ทำให้สามารถนำไปคำนวณหาค่าดัชนีซีเทนได้จาก

$$CCI = -420.34 + 0.016G^2 + 0.192G \log M + 65.01 \log M^2 - 0.0001809M^2 \quad (3.1)$$

โดย G คือ API Gravity

M คือ จุดที่ปริมาตรร้อยละ 50 อุณหภูมิของการกลั่นของน้ำมันตัวอย่าง (°F)

$$API \text{ Gravity} = (141.5 / \text{ความถ่วงจำเพาะที่ทราบค่า}) - 131.5 \quad (3.2)$$

รวมไปถึงการแปลงหน่วยอุณหภูมิจากอุณหภูมิจองศาเซลเซียสไปเป็นหน่วยอุณหภูมิจองศาฟาเรนไฮต์ สามารถหาได้จาก

$$\text{อุณหภูมิจองศาฟาเรนไฮต์ (°F)} = [(5/9) \times \text{อุณหภูมิจองศาเซลเซียสที่ทราบค่า (°C)}] + 32$$

2) การวัดค่าดัชนีซีเทนของเชื้อเพลิงไบโอดีเซล ในปี 1983 Klopfenstein ได้สร้างสูตรในการคำนวณหาค่าดัชนีซีเทนของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันพืชต่าง ๆ โดยใช้องค์ประกอบของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันพืชและได้ดัชนีซีเทนที่ใกล้เคียงกว่าสมการ ASTM ข้างต้น ดัชนีซีเทนของ Klopfenstein หาได้ดังนี้

$$CCI = [(\%A.C) + (\%B.C) + \dots (\%W.C)] / 100 \quad (3.3)$$

% A, % B, ... % W คือ ร้อยละของกรดไขมัน A, B และ ... W ในน้ำมันเชื้อเพลิง  
 $C_a, C_b \dots C_w \dots$  คือ ดัชนีชี้แทนของกรดไขมัน A, B และ ... W

ส่วนดัชนีชี้แทนของกรดไขมันนั้น หาได้ตามสมการที่ 3.4

$$\text{ดัชนีชี้แทนของกรดไขมัน} = 58.1 + 2.8 \cdot ((n-8)/2) - 15.9(\text{จำนวนพันธะคู่}) \quad (3.4)$$

n = จำนวนคาร์บอนในกรดไขมัน

### 3.3.6 การทดสอบค่าความบริสุทธิ์หรือมีปริมาณเมทิลเอสเตอร์

การทดสอบค่าความบริสุทธิ์หรือมีปริมาณเมทิลเอสเตอร์จะใช้เครื่องมือเรียกว่า “โครมาโทกราฟี (Chromatography)” ภายใต้มาตรฐาน EN 14103 โดยที่อาคารเครื่องมือ 10 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เครื่องมือที่ใช้งานจะเป็นแบบแก๊ส (Gas Chromatography, GC) ซึ่งจะเป็นเครื่องมือ Gas Chromatography (GC) รุ่น Agilent 7890A ใช้สำหรับแยกสารผสมที่เป็นแก๊ส โดยมีเฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สเช่นกันแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารผสม โดยมีสารละลายเมทิลเฮปทาดีเคโนเอต (Methyl-heptadecanoate) ทำหน้าที่เป็นตัวสารผสม ส่วนเฟสอยู่กับที่อาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ เมื่อทั้งตัวพาและสารผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นี้ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จะดึงดูดด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ตามความเป็นขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน สารผสมก็จะถูกแยกออกจากกันนั่นเอง เครื่องมือ Gas Chromatography (GC) รุ่น Agilent 7890A ประกอบด้วย

- Voltage stabilizer ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้สม่ำเสมอ อุปกรณ์ตัวนี้เป็นตัวที่ต่อตรงเข้ากับระบบจ่ายไฟหลักของอาคาร โดยตัวเครื่อง GC และไมโครคอมพิวเตอร์ (PC) ที่ใช้ควบคุมเครื่องจะต่อตรงเข้ากับตัว Voltage stabilizer นี้

- เครื่อง Gas Chromatography (GC)-2014 (FPD)
- ระบบจ่ายแก๊ส ซึ่งประกอบด้วยแก๊ส 3 ชนิด คือ ฮีเลียม (He) ใช้เป็น Carrier Gas, ไฮโดรเจนใช้ในการจุดเปลวไฟ และอากาศใช้ในการจุดเปลวไฟ

- ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งประกอบด้วยชุดคอมพิวเตอร์ (PC)

- 1) ภาวะเริ่มต้นของระบบต่าง ๆ

### ระบบไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

- Voltage stabilizer ต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟหลักของห้องปฏิบัติการ
- Voltage stabilizer อยู่ในตำแหน่งปิด
- ระบบไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ ต่อเข้ากับ Voltage stabilizer
- อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่งปิด ระบบไฟฟ้าของ GC ต่อเข้ากับ Voltage stabilizer

### ระบบจ่ายแก๊ส

- วาล์วหัวท่อแก๊สทุกท่ออยู่ในตำแหน่งปิด
  - Pressure regulator ของท่อแก๊สแต่ละท่ออยู่ในตำแหน่งปิด
  - เครื่อง Gas Chromatography (GC)
  - สวิตช์ Power ของเครื่อง GC อยู่ในตำแหน่งปิด
  - วาล์วปรับความดันแก๊สไฮโดรเจนและอากาศอยู่ในตำแหน่งปิด
- 2) ลำดับการเปิดอุปกรณ์
- เปิดฮีเลียมที่ใช้เป็น Carrier Gas > เปิดวาล์วที่หัวท่อแก๊สฮีเลียม > เปิด Pressure Regulator โดยตั้งความดันขาออกไว้ที่  $5 \text{ kg/cm}^2$  ซึ่งค่าความดันขาออกนี้ต้องตั้งให้สูงพอที่จะทำให้การปรับอัตราการไหลของ Carrier Gas (ปรับจากคอมพิวเตอร์) ทำได้ง่าย และต้องเพื่อความดันสำหรับการทำงานในกรณีที่คอลัมน์ทำงานที่อุณหภูมิสูงด้วย
  - เปิด Voltage stabilizer โดยกดปุ่ม On ที่อยู่เหนือจอด้านหน้าของตัวเครื่อง
  - Voltage stabilizer ที่มีอยู่ 2 เครื่องนั้นต่อตรงเข้ากับระบบไฟฟ้าของอาคาร และไฟด้านขาออกของ Voltage stabilizer แต่ละเครื่องต่อเข้ากับเต้ารับที่อยู่ด้านบน
  - เปิดเครื่อง Gas Chromatography (GC) โดยกดปุ่ม Power ที่ตัวเครื่อง GC ไปที่ตำแหน่ง ON
  - เปิดคอมพิวเตอร์
- 3) การเตรียมการวิเคราะห์โดยป้อนคำสั่งผ่านคอมพิวเตอร์
- หลังจากเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว เปิดโปรแกรม GC solution โดยเลือกที่ GC solution จะปรากฏหน้าต่าง Shimadzu GC Solution ขึ้นมา
  - การเปิดโปรแกรม GC Solution จากหน้า Desktop ซึ่งถ้าต้องการเชื่อมต่อกับเครื่อง Gas Chromatography (GC) ให้คลิกที่ Instrument 1

- เมื่อเลือก Instrument 1 แล้วจะปรากฏหน้าต่างสำหรับให้ log in ในช่อง User ID จากนั้นคลิก OK
- หลังจากคลิก OK โปรแกรมจะนำเข้าสู่หน้า GC Real Time Analysis
- จากหน้า GC Real time analysis ให้คลิกที่เมนู Instrument แล้วเลือก System Check หลังจากกด System check แล้ว จะปรากฏหน้าต่าง System check แล้วทำการให้กดปุ่ม Run
- การตั้งภาวะการทำงานของเครื่อง ในกรณีที่มีการบันทึกภาวะการทำงาน ของเครื่องเอาไว้ Method File แล้ว
  - เปิด Method File ที่ต้องการใช้งาน โดยเลือก File > Open method file ขั้นตอนนี้เป็นกรเลือก condition ที่ต้องการทำ
  - ในกรณีที่ต้องการตั้งภาวะการทำงานของเครื่องใหม่ คืออุณหภูมิของ Injector port (INJ), Oven (หรือ Column) และ Detector port (FPD) ถ้าหากของเดิมที่มีอยู่ไม่เป็นไปตามต้องการหรือ ไม่มี ก็ให้ตั้ง condition ใหม่ดังนี้ คือ การตั้ง condition ใหม่ (หรือการตั้งอุณหภูมิ ใหม่)
  - การตั้ง Injector temperature (INJ Temp.) และ Carrier Gas Flow Rate (Flow) จากนั้นเลือก Tab INJ Temp. > สำหรับการวิเคราะห์ SO<sub>2</sub> และ SO<sub>3</sub> จากระบบ DeNO<sub>x</sub> ในขณะนี้เราตั้งที่ 110 °C
  - Flow > สำหรับคอลัมน์ปัจจุบัน เราตั้ง Carrier Gas Flow Rate ไว้ที่ 15 ml/min
  - การตั้ง Column temp. และ Equilibrium Time ทำการเลือก Tab Column > Column Temp. > ปัจจุบันใช้ที่ 180 °C คงที่ตลอดการวิเคราะห์ > Equilibrium time > ปัจจุบันตั้งไว้ที่ 3 นาที
  - ในความเป็นจริงเครื่องไม่ได้วัดอุณหภูมิของ Column แต่วัดอุณหภูมิของ อากาศใน Oven ในการวิเคราะห์ที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิ (temperature programmed) นั้น อุณหภูมิ ของ Column จะตามหลังอุณหภูมิของ Oven อยู่ เช่นสมมุติว่าเราวิเคราะห์แบบเพิ่มอุณหภูมิระบบ ขึ้นเรื่อยๆ เช่นเพิ่มจาก 120 °C เป็น 180 °C พอเสร็จการวิเคราะห์ต้องรอให้อุณหภูมิระบบเย็นตัวลง กลับมาที่ค่าเริ่มต้นใหม่ (120 °C) เมื่ออุณหภูมิอากาศใน Oven เย็นลงมาอยู่ที่ 120 °C อุณหภูมิของ Column จะยังสูงกว่า 120 °C อยู่เล็กน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรอให้อุณหภูมิของ Column ใกล้เคียง หรือเท่ากับอุณหภูมิของ Oven ช่วงเวลาที่ต้องรอก่อนนี้คือ Equilibrium Time นั่นเอง

- ถ้าไม่รอให้อุณหภูมิเริ่มต้นของ Column เท่ากันทุกครั้ง จะพบว่าเวลาที่พีค (Peak) ออกมาจากคอลัมน์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงไป

- การตั้ง Detector temperature (หรือ FPD Temperature) ทำการเลือก Tab FPD > Temp. > ต้องไม่ต่ำกว่า 100 °C และไม่ควรถ่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยปรกติมักจะตั้งไว้ที่อุณหภูมิคอลัมน์ + 20 °C ดังนั้นถ้าว่ากันตามนี้เมื่อตั้ง Column Temp. ที่ 180 °C จึงควรตั้ง FPD Temp. ไว้ที่ 200 °C แต่เพื่อป้องกันไม่ให้ตัว FPD ร้อนเกินไป จึงตั้งเพียงแค่ 185 °C ก็พอ > Sampling rate > เป็นการตั้งความถี่ในการเก็บข้อมูลว่าถ้าให้เก็บทุก ๆ ก็มีลิวินาที (msec) ถ้าตั้งไว้ที่ค่าเวลาน้อย ๆ (เช่น 10 หรือ 20 msec) ระบบจะเก็บข้อมูลถี่มาก (เหมาะสำหรับพีคที่สูงและแคบ) ซึ่งจะ ทำให้จุดข้อมูลมีจำนวนมาก เท่าที่ผ่านมานั้นเราใช้เพียง 80 msec ก็เพียงพอ > Delay time > เป็นการตั้งเวลาที่จะให้เริ่มเก็บข้อมูลหลังเริ่มกด run สำหรับเราให้ตั้งเป็น 0 min > Subtract Detector > ใช้ในกรณีที่ต้องการนำสัญญาณจาก Detector 2 ตัวมาหักลบกัน ให้ตั้งเป็น None เพราะมีเพียง Detector เดียว

- การตั้งค่า FPD Temperature Sampling Rate และ Stop Time
- เมื่อตั้งค่า Condition เรียบร้อยแล้ว กด save method File (การตั้งชื่อ ไฟล์ ควรตั้งให้เป็นระบบ เช่นระบบ ปี-เดือน-วัน ของวันที่สร้างไฟล์ และรายละเอียดย่อ ๆ)

- ส่งค่า Parameter ไปยังเครื่อง Gas Chromatography (GC) โดยเลือก Acquisition > Download Instrument Parameter

- ตั้ง System On โดยเลือก Instrument > System On
- เปิดหน้าจอ GC System On โดย > รอจนอุณหภูมิของ FPD ได้ระดับตามต้องการ (ต้องไม่ต่ำกว่า 100°C) > เปิดวาล์วที่หัวท่อไฮโดรเจน > เปิด pressure regulator ที่หัวท่อแก๊ส โดยตั้งความดันขาออกไว้ที่ 5 kg/cm<sup>2</sup> > ปรับความดันไฮโดรเจนเข้าเครื่องโดยการหมุนปุ่มปรับ (อยู่บนผนังด้านบนด้านหลังของตัวเครื่อง)

- โดยตั้งความดันขาออกไว้ที่ 130 kPa > เปิดวาล์วที่หัวท่ออากาศ > เปิด Pressure Regulator ที่หัวท่อแก๊ส โดยตั้งความดันขาออกไว้ที่ 5 kg/cm<sup>2</sup> > ปรับความดันอากาศเข้าเครื่องโดยการหมุนปุ่มปรับ (อยู่บนผนังด้านบนด้านหลังของตัวเครื่อง) โดยตั้งความดันขาออกไว้ที่ 50 kPa

- ความดันด้านขาออกจาก pressure regulator ที่หัวถังควรสูงกว่าความดันที่จะตั้งที่ตัวเครื่องอย่างน้อยประมาณ 0.5 bar ขึ้นไป

## 5) การจุด Flame FPD

- โดยหลักแล้ว FPD จะใช้แก๊สไฮโดรเจนมากเกินไป (เผาไหม้ไม่หมด) ประกติแล้วเพื่อให้การจุดไฟทำได้ง่าย เรามักจะใช้ไฮโดรเจนในปริมาณมากและอากาศในปริมาณน้อย เมื่อจุดไฟติดแล้วจึงค่อยลดปริมาณไฮโดรเจนและ/หรือเพิ่มปริมาณอากาศ เพื่อให้เปลวไฟมีสัดส่วนของแก๊สผสมดังต้องการ ดังนั้นในขั้นตอนนี้ควรมีการแทรกเพิ่มเติม (ต้องได้จากการทดลองทำ) ว่าเริ่มต้นนั้นควรเปิดแก๊สไฮโดรเจนและอากาศที่ความดันเท่าใดก่อน และเมื่อจุดเปลวไฟติดแล้วจึงค่อยปรับความดันแก๊สให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ ฟังก์ชันที่เรียกว่าความว่องไวของ FPD ขึ้นอยู่กับสัดส่วนไฮโดรเจนต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ด้วย เครื่องรุ่นที่ใช้จะปรับส่วนผสมระหว่างไฮโดรเจนกับอากาศโดยใช้การควบคุมความดันที่สั่งจากหน้าจอคอมพิวเตอร์ ส่วนอัตราการไหลที่แท้จริงนั้นให้อ่านจากกราฟที่ติดอยู่บนตัวเครื่อง

- ฟังก์ชันที่เรียกว่าเครื่องสามารถปรับความดันแก๊สที่ไหลเข้า Detector ได้ในช่วงความดันที่ไม่สูงเกินกว่าความดันแก๊สที่ไหลเข้าเครื่อง เช่นถ้าเราปรับวาล์วความดัน สำหรับอากาศไว้ที่ 50 kPa ถ้าเราปรับวาล์วความดันอากาศผ่านคอมพิวเตอร์ที่ค่าใด ๆ ที่ต่ำกว่า 50 kPa เครื่องก็จะปรับความดันแก๊สให้เท่ากับค่าความดันที่เราป้อนเข้าไป แต่ถ้าเราปรับวาล์วความดันที่สูงกว่าความดันขาออกจากวาล์วปรับความดัน เช่น ตั้งวาล์วไว้ที่ 50 kPa แต่ป้อนค่า 60 kPa ผ่านคอมพิวเตอร์ ความดันแก๊สที่เข้า detector ก็จะมีเพียง 50 kPa เท่านั้น ในระหว่างการจุด flame นั้นอาจต้องทำการปรับค่าความดันผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์นั้นจน flame ติดก่อน จากนั้นจึงค่อย ๆ ปรับค่าความดันแก๊สให้ไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่ต้องการ

- รอจน Detector temperature มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 100 °C
- ตั้ง Detector On โดย กดปุ่ม "On" ของ Detector
- ตั้งจุด Flame โดย กดปุ่ม "On" ของ Flame ถ้า flame ไม่ติดก็ให้จุดซ้ำใหม่
- ถ้า Flame ติดแล้วให้ค่อย ๆ ปรับค่าความดันของไฮโดรเจนและอากาศให้ไปอยู่ยังค่าที่ต้องการ (ไฮโดรเจน 125 kPa อากาศ 35 kPa) ระหว่างนี้ต้องคอยสังเกตสัญญาณ FPD ด้วยว่าขาดหายไปหรือไม่ ซึ่งแสดงว่า flame คับ และต้องจุดใหม่

- เมื่อ flame ติดแล้ว ให้รอจน baseline นิ่ง แล้วตั้ง Zero Adjust โดยคลิกปุ่ม Zero Adjust ซึ่งอยู่ด้านขวาของ Signal display ตรงนี้ไม่แนะนำให้ทำการปรับ Zero Adjust ให้รอจน Base Line นิ่ง และบันทึกข้อมูลสัญญาณด้วยว่า Base line ไปนิ่งที่ระดับใด เพราะข้อมูลนี้สามารถใช้ตรวจสอบได้ว่า Detector มีปัญหาหรือไม่

- สร้าง file เพื่อเก็บข้อมูล > สร้างหรือเลือก Folder เพื่อเก็บ Data file โดยคลิก File > Select project (Folder) > เลือก Folder ที่ต้องการ (หรือคลิก New Folder เพื่อสร้าง Folder ใหม่) > คลิก close

- ในการฉีดสารตัวอย่างนั้น เครื่องนี้ติดตั้งระบบ Sampling Loop สำหรับฉีดสารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส (ขนาดปริมาตรของ Loop คือ 0.1 ml ขอให้มีการตรวจสอบ) โดยออกแบบมาเพื่อต่อ On-Line กับระบบเครื่องปฏิกรณ์ ด้านขาเข้าของคอลัมน์นั้นต่อเข้ากับวาล์วฉีดสารตัวอย่าง ไม่ได้ติดตั้งคอลัมน์ไว้สำหรับฉีดสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว ดังนั้นถ้าเปิด Oven คุณจะเห็นว่าจาก Injector Port สำหรับฉีดสาร โดยใช้ Syringe ที่อยู่ทางด้านบนของตัวเครื่อง Gas Chromatography (GC) นั้น ข้างล่างจะไม่มีคอลัมน์ต่ออยู่

6) ขั้นตอนการปิดเครื่อง ซึ่งการสั่งการผ่านระบบคอมพิวเตอร์

- ตั้ง Detector OFF โดยคลิกปุ่ม OFF ของ Detector บน Instrument Monitor
- เปิด Method Cool Down แล้วสั่ง Download > Method Cool Down นี้เป็นโปรแกรมที่ทางผู้ Set Up ระบบเขียนไว้ให้ สามารถปรับแต่งได้
- รอจนอุณหภูมิของ FPD และ INJ ต่ำกว่า 80 °C และอุณหภูมิของ Column ต่ำกว่า 40 °C
- ตั้ง System OFF โดยเลือกคำสั่ง Instrument > System OFF
- จะพบว่าไฟ LED indicator หน้าเครื่อง Gas Chromatography (GC) ของ Temp. และ Flow ดับ จึงปิด Software GC Real Time
- ปิด Power Switch ของเครื่อง Gas Chromatography (GC)
- ปิดวาล์วที่หัวท่อแก๊สฮีเลียม, ไฮโดรเจน และอากาศที่หัวท่อแก๊สทุกท่อให้ครบ รอจนความดันใน Pressure Regulator ที่หัวท่อแก๊สทุกท่อลดลงเป็นศูนย์ (ทั้งด้านความดันสูงและด้านความดันต่ำ) จากนั้นจึงปิด Pressure Regulator ทุกตัว



รูปที่ 3.12 เครื่องมือ Gas Chromatography (GC) รุ่น Agilent 7890A



### 3.4 การทดสอบการวัดมลพิษ

ในส่วนของการวัดการปล่อยมลพิษหลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์รอบต๋านั้นประกอบไปด้วย ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide, NO<sub>x</sub>), คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO) และไฮโดรคาร์บอน (Unburned Hydrocarbon, HC) ในการวัดการปล่อยมลพิษที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์หลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์นั้น จะทำการวัดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลรอบต๋า จำนวน 1 สูบ ที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบ/นาที โดยมีภาระกระทำกับเครื่องยนต์ที่ภาระกระทำที่ 3, 9 และ 15 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 5.4, 16.3 และ 27.22 นิวตันเมตร และปรับค่าอัตราส่วนกำลังอัดที่ 16, 17 และ 18 ตามลำดับ โดยน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการวัดการปล่อยมลพิษมี 4 ประเภท ประกอบด้วย น้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันจากพืชทั้งหมด 3 ชนิด สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการดำเนินการในการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงวิธีการในการทดสอบดังที่จะกล่าวเป็นลำดับต่อไป

#### 3.4.1 เครื่องยนต์ดีเซลสำหรับการทดสอบ

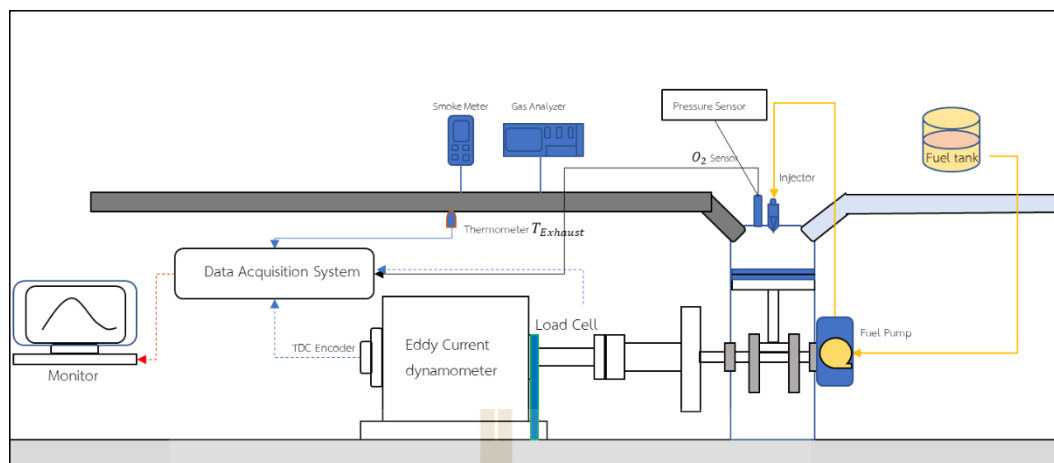
สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับการทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษนั้นจะใช้เครื่องยนต์ดีเซล RESEARCH ENGINE TEST SET UP รุ่น 240PE รายละเอียดข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลนี้จะแสดงดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ

Engine	Specification
Model	TV1
Make	Kirloskar Oil engines
Engine type	1 cylinder, 4 strokes, Water cooled, Direct injection
Bore	87.5 mm
Stroke	110 mm
Connecting rod length	234 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1,500 rpm
Compression ratio	12-18
Dynamometer	Eddy current, Water cooled

### 3.4.2 การทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค

การทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษหลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำนั้นจะประกอบด้วย ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide, NO<sub>x</sub>), คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO) และไฮโดรคาร์บอน (Unburned Hydrocarbon, HC) ในการวัดการปล่อยมลพิษที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์หลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์นั้นจะทำการวัดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบ/นาที โดยมีภาระกระทำกับเครื่องยนต์ที่โหลดทำที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของกำลังเครื่องยนต์ที่สามารถผลิตได้สูงสุด 3.5 กิโลวัตต์ ที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยมีปรับอัตราส่วนการอัดเครื่องยนต์ทั้งหมด 3 อัตราส่วนการอัด ได้แก่ 16:1, 17:1 และ 18:1 และมีองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง 24 องศา ก่อนจุดศูนย์ตายบนดิ่งที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว โดยที่การวัดค่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Testo รุ่น 350 ส่วนไฮโดรคาร์บอนใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Horiba รุ่น MEXA-584L และความสามารถในการวัดการปล่อยมลพิษนั้น ได้แก่ ความสามารถในการวัดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ สามารถวัดได้ในช่วง 0-500 ppm, ความสามารถในการวัดการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถวัดได้ในช่วง 0-10,000 ppm, ความสามารถในการวัดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สามารถวัดได้ในช่วง 0-50% Vol. และความสามารถในการวัดการปล่อยไฮโดรคาร์บอนสามารถวัดได้ในช่วง 0-500 ppm ขณะที่การวัดอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของเครื่องยนต์ดีเซลนั้นจะทำการวัดโดยใช้ Fuel flow transmitter เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูญเสียไปในขณะที่เครื่องยนต์กำลังทำงาน และสามารถวัดจากหลอดสเกลโดยมีหลักการคือ ที่ช่วงเวลาหนึ่งขณะที่เครื่องยนต์ทำงานอยู่ในหลอดบอกสเกลที่เก็บน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์จะมีปริมาตรอยู่ค่าหนึ่ง เมื่อเปิดให้เริ่มการวัดเวลาผ่านไป 60 วินาที ปริมาตรของน้ำมันเชื้อเพลิงในหลอดสเกลก็จะลดลงเหลือกี่ ml แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการไหล โดยในการทดลองนี้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแผนภาพในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเครื่องยนต์

จากรูปที่ 3.14 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเครื่องยนต์ เพื่อการวัดการปล่อยมลพิษ และการวัดอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจาเพาะเบรก โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบไปด้วย

- 1) เครื่องยนต์ดีเซลสำหรับการทดสอบ (Diesel Engine)
- 2) ไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Eddy Current Dynamometer) สำหรับใช้ให้ภาระกระทำต่อเครื่องยนต์ดีเซล
- 3) โหลดเซลล์ (Load Cell) สำหรับวัดค่าแรงบิด (Torque)
- 4) เฟลา และอุปกรณ์จับเชื่อมให้เฟลาของเครื่องยนต์ดีเซลและเฟลาจากไดนาโมมิเตอร์ให้หมุนรวมกันได้ (Shaft and Coupling)
- 5) อุปกรณ์วัดความเร็วรอบของการหมุนของเฟลาเครื่องยนต์ (Encoder)
- 6) หน้าจอแสดงผลค่าแรงบิด และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ในที่นี้ใช้คอมพิวเตอร์ (Monitor Display)
- 7) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไดนาโมมิเตอร์ สำหรับสร้างแรงเบรกให้กับเครื่องยนต์ (Regulated Power Supply)
- 8) ถังน้ำมันสำหรับใส่น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel Beaker)
- 9) บีกเกอร์สำหรับใส่น้ำมันที่ใช้ในการทดสอบ (Fuel Sampling for Test Beaker)
- 10) เครื่องวัดอัตราการไหล Fuel flow transmitter DP transmitter (0-500 mmWC)
- 11) เครื่องมือวัดการปล่อยมลพิษ โดยในการวัดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Testo รุ่น 350 ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรคาร์บอนใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Horiba รุ่น MEXA-584L

จากรูปที่ 3.15 ขั้นตอนในการวัดการปล่อยมลพิษนั้น ประกอบด้วย

- 1) เช็ควิธีการเตรียมของอุปกรณ์ต่าง ๆ และจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้มีความพร้อมก่อนทำการทดสอบ
- 2) ทำการติดตั้งสายเซ็นเซอร์ (Sensor) จากโหลดเซลล์ (Load Cell) และอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของการหมุนของเพลาเครื่องยนต์ (Encoder) เข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ต่อกับหน้าจอแสดงผลค่าแรงบิด และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ซึ่งในที่นี้ใช้คอมพิวเตอร์ (Monitor Display) และเปิดคอมพิวเตอร์ สำหรับแสดงผล ได้แก่ ค่าแรงบิด และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ที่วัดได้จากโหลดเซลล์ (Load Cell) และอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของการหมุนของเพลาเครื่องยนต์ (Encoder) ตามลำดับ
- 3) ทำการติดตั้งสายไฟฟ้าจากอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Regulated Power Supply) เข้ากับกับไดนาโมมิเตอร์ (Eddy Current Dynamometer) สำหรับสร้างแรงเบรกให้กับเครื่องยนต์
- 4) เปลี่ยนถ่ายน้ำมันสำหรับใช้ในการทดสอบเข้าไปในเครื่องยนต์ดีเซล กรณีที่ไม่ใช้น้ำมันดีเซลจากถังบรรจุน้ำมันของเครื่องยนต์ โดยเปิดวาล์ว (Fuel Valve) น้ำมันจากบีกเกอร์ที่ใส่น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบให้น้ำมันไหลจากบีกเกอร์เข้าไปไปที่เครื่องยนต์บริเวณปั๊มดูดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์
- 5) เมื่อเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเรียบร้อยแล้ว ทำการสตาร์ทเครื่องยนต์ให้เครื่องยนต์ทำงาน
- 6) ปรับลิ้นเร่งของเครื่องยนต์ เพื่อเพิ่มรอบการหมุนของเพลาของเครื่องยนต์ให้ได้จำนวนรอบที่ต้องการสำหรับการทดสอบ ค่าความเร็วรอบของเพลาของเครื่องยนต์จะไปแสดงผลที่หน้าจอแสดงผล (Monitor Display)
- 7) เมื่อได้จำนวนรอบที่ต้องการแล้ว จากนั้นสร้างภาระกระทำกับเครื่องยนต์ โดยทำปรับปั๊มจ่ายกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Regulated Power Supply) กระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายไปที่ ไดนาโมมิเตอร์ (Eddy Current Dynamometer) แล้วสังเกตที่หน้าจอแสดงผล (Monitor Display) ว่าค่าแรงบิด (Torque) ที่แสดงออกมาจากโหลดเซลล์ (Load Cell) นั้นเป็นไปดังที่ต้องการหรือไม่ เมื่อได้ภาระกระทำในลักษณะของค่าแรงบิด (Torque) ที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษและเก็บข้อมูลลักษณะการเผาไหม้ไปพร้อม ๆ กัน โดยมี Pressure sensors เป็นตัวตรวจจับลักษณะผ่านไหม้แล้วนำมาพร้อมในโปรแกรม IEngingSof
- 8) ก่อนหน้านั้นระหว่างทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทดสอบ จะต้องทำการติดตั้งโพรบเซ็นเซอร์ (Sensor) ที่ใช้วัดการปล่อยมลพิษ รวมถึงสายปลั๊กไฟเข้ากับตัวเครื่องมือ

วัดมลพิษทั้ง 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Testo รุ่น 350 เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Horiba รุ่น MEXA-584L เครื่องมือวิเคราะห์เขม่ายี่ห้อ WAGER รุ่น DIGITAL SMOKE METER MODEL 6500 และเปิดเครื่องมือวัดมลพิษไว้เพื่อรอทำการวัดการปล่อยมลพิษหลังจากที่ทำการปรับความเร็วรอบของเพลลาของเครื่องยนต์ และภาระกระทำกับเครื่องยนต์ในรูปของแรงบิดได้แล้ว

9) เมื่อปรับความเร็วรอบของเพลลาของเครื่องยนต์ และภาระกระทำกับเครื่องยนต์ในรูปของแรงบิดได้ตามที่ต้องการแล้ว ทำการวัดมลพิษโดยการใส่โพรบเซ็นเซอร์ (Sensor) สำหรับใช้วัดการปล่อยมลพิษเข้าไปที่ท่อไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล จากนั้น จับเวลา 30 วินาทีในการวัดค่าการปล่อยมลพิษ เมื่อเวลาครบ 30 วินาทีแล้วให้ทำการบันทึกผลการปล่อยมลพิษ

10) เนื่องจากเครื่องมือวัดการปล่อยมลพิษมี 2 เครื่อง จึงต้องทำการวัดการปล่อยมลพิษทีละเครื่อง โดยทำตามวิธีในข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกัน

11) ทำการวัดการปล่อยมลพิษ 3 ครั้ง เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษ

12) เมื่อทำการวัดมลพิษเสร็จแล้ว ให้ทำการปรับลดภาระที่กระทำกับเครื่องยนต์ลง แล้วดับเครื่องยนต์ จากนั้น ถายน้ำมันดีเซลเข้าไปให้เครื่องยนต์แล้วสตาร์ทเครื่องยนต์ให้ทำงานเพื่อให้น้ำมันดีเซลได้เข้าไปล้างน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่ใช้ทดสอบก่อนหน้านี้ให้หมดไป ก่อนจะทำการดับเครื่องยนต์เพื่อพักเครื่องยนต์สำหรับทำการวัดการปล่อยมลพิษในรอบถัดไป

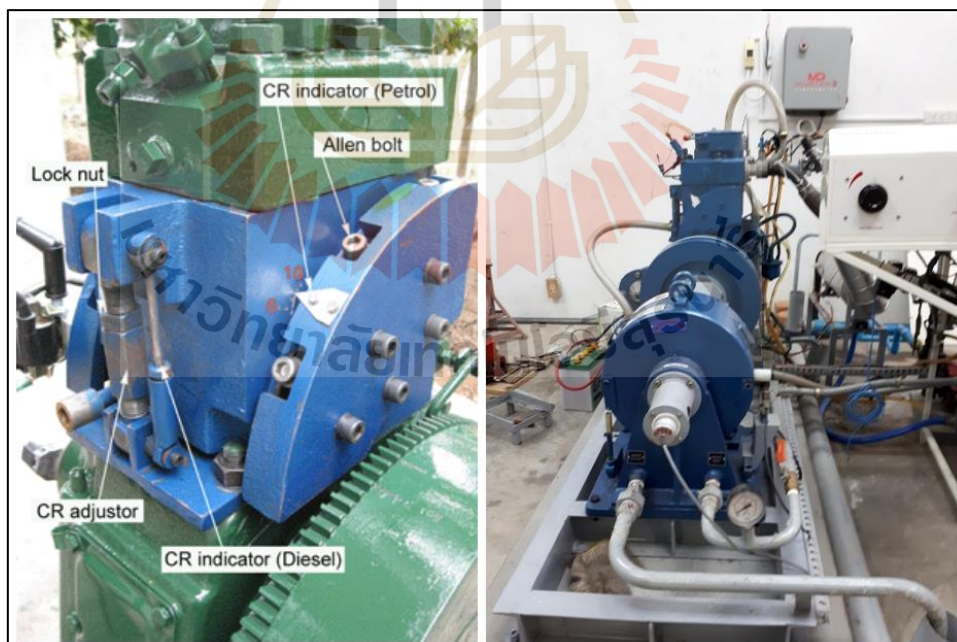
13) ในรอบถัดมา เปลี่ยนตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบและถายน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างใหม่เข้าไปที่เครื่องยนต์ให้เรียบร้อย จากนั้น ดำเนินการทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษดังขั้นตอนที่กล่าวมาก่อนหน้านี้เช่นเดิม

14) เมื่อทำการทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษเสร็จแล้ว ทำการจัดเก็บอุปกรณ์ต่างๆให้เรียบร้อย รวมถึงเช็กลูบเพลลา และอุปกรณ์จับเชื่อมให้เพลลาของเครื่องยนต์ดีเซลและเพลลาจากไดนาโมมิเตอร์ (Shaft and Coupling) ให้มีความยึดติดกันให้แน่นอยู่เสมอ ถ้าเกิดอาการหลวม ก็ให้ทำการขันน็อตสำหรับยึดอุปกรณ์ทั้งสองให้แน่นเช่นเดิม

จากรูปที่ 3.17 ขั้นตอนในการวัดอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงประกอบด้วย

1) วางเครื่องชั่งน้ำหนักของน้ำมันที่ใช้ทดสอบ (Weight Apparatus) ลงที่แท่นสำหรับวางเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วนำบีกเกอร์ที่ใส่น้ำมันเชื้อเพลิงที่เป็นตัวอย่างในการทดสอบวางลงบนเครื่องชั่งน้ำหนัก

- 2) ติดตั้งท่อทางเดินน้ำมันที่ปิกเกอร์ที่ใส่น้ำมันเชื้อเพลิงที่เป็นตัวอย่างในการทดสอบ แล้ววาล์ว น้ำมัน (Fuel Valve) จากปิกเกอร์ที่ใส่น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบให้น้ำมันไหลจากปิกเกอร์เข้าไปไปที่เครื่องยนต์บริเวณปั๊มคูดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์
- 3) จากขั้นตอนในการวัดการปล่อยมลพิษ ในช่วงที่ปรับความเร็วรอบของเพลลาของเครื่องยนต์ และภาระกระทำกับเครื่องยนต์ในรูปของแรงบิดได้ตามที่ต้องการแล้ว ทำการเปิดการวัดอัตราการไหล แล้วทำการจับเวลา 60 วินาที เมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาทีแล้ว ให้ทำการหยุดจับเวลาและดูค่าระดับสเกลของน้ำมันเชื้อเพลิงตัวอย่างที่หายไป จากนั้นทำการบันทึกผลการทดลอง
- 4) ทำการทดลอง 3 ครั้ง เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบการวัดอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิง
- 5) ดำเนินขั้นตอนการวัดอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงแทรกเข้าไป ในขณะที่ทำการทดสอบการวัดการปล่อยมลพิษ เพื่อให้ได้ผลของการทดสอบครบตามประเภทของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ทดสอบ
- 6) เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้ว ทำการจัดเก็บอุปกรณ์เช่นเดียวกับดังที่กล่าวไป แล้วในขั้นตอนการวัดการปล่อยมลพิษ



รูปที่ 3.14 เครื่องยนต์ดีเซล RESEARCH ENGINE TEST SET UP รุ่น 240PE



รูปที่ 3.15 เครื่องมือวัดมลพิษไอเสีย

### 3.5 การทดสอบสมรรถนะ

- 1) ตรวจสอบการไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นสำหรับเครื่องวัด Eddy current dynamometer และเครื่องยนต์และเครื่องวัดความร้อน
- 2) เริ่มต้นการตั้งค่าและใช้เครื่องยนต์โดยไม่มีภาระโหลดนาน 4-5 นาที
- 3) ค่อย ๆ เพิ่มโหลดในเครื่องยนต์โดยการหมุนปุ่มบนเครื่องโหลดไดนาโมมิเตอร์จนเครื่องยนต์โหลดเต็มที่ (เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นความเร็วจะลดลงอย่างมาก) และปรับรอบเครื่องยนต์ไปยังรอบที่เราต้องการให้คงที่
- 4) หลังจากเก็บข้อมูลการทดสอบ แล้วจึงค่อย ๆ ลดโหลดเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดสำหรับการสังเกตครั้งถัดไปและทำซ้ำตามขั้นตอนข้างต้น เพิ่มเติมข้อสังเกตในรูปที่ 3.16 ภาพตารางข้อมูลการเชื่อมต่อเครื่องยนต์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์และแผนมีประสิทธิภาพ

Research Engine Test set up Product 240 PE											
Diesel Mode											
Note: Do not enter values in cells with yellow background.											
System constants											
Orifice meter diameter(m)	0.02	Cylinder diameter (m),D	0.0875								
Dynamometer arm length (m)	0.185	Stroke(m),L	0.11								
Coeff.of discharge for orifice,Cd	0.6	No of cylinders	1								
Ambient temperatue (Deg C)	31	No.of rev./cycle	2								
Fuel density(kg/m3)	830	Specific heat of exhaust(kJ/kg0K)	-0.6279								
Fuel Calorific value (KJ/kg)	46487										
Experiment 1: Engine performance test at preset compression ratio											
Compression ratio	18										
Observations											
Speed (RPM)	Load (kg)	Mano. Deflection (mm)	Fuel flow (Secs / 10ml.)	Jacket water (LPH)	Calorim eter water (LPH)	Engine water in (DegC)	Engine water out (DegC)	Cal. water in (DegC)	Cal water out (DegC)	Ex. temp. cal. In (DegC)	Ex. temp. cal out (DegC)
1506	3.17	61.485	50	150	200	34.255	46.069	34.68	35.63	209.524	145.15
1506	5.869	70.194	34.50259	150	200	34.264	59.144	39.012	37.099	287.862	219.71
1501	8.929	60.999	25.44098	150	200	34.246	63.82	40.16	37.854	352.358	260.57
1502	11.866	56.126	17.295	100	200	34.24	71.259	41.963	39.375	451.577	318.66
Results											
Air density(kg/m <sup>3</sup> )	1.16										
BP (kW)	BMEP (BAR)	BSFC kg/kWh	BTheff (%)	Air flow (kg/h)	Fuel flow (kg/h)	Vol eff (%)	A/F Ratio	Heat Equi.of work	Heat by jacket	Heat by exhaust (%)	Unaccounted (%)
0.91	1.09	0.66	11.76	25.37	0.60	73.27	42.45	11.76	26.702	-10.48	72.02
1.68	2.02	0.52	15.02	27.11	0.87	78.29	31.30	15.02	38.805	-11.21	57.38
2.55	3.08	0.46	16.80	25.27	1.17	73.23	21.52	16.80	34.012	-9.77	58.96
3.39	4.09	0.51	15.19	24.24	1.73	70.19	14.03	15.19	19.295	-8.54	74.06

รูปที่ 3.16 ตารางข้อมูลการเชื้อที่อัฟเครื่องยนต์



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

ในส่วนของหัวข้อนี้เป็นการอภิปรายผลจากการศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม มะพร้าว และรำข้าว โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและนำไปผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลง โหลดของเครื่องยนต์และอัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ, ความหนืด, ความหนาแน่น, การกลั่น, ดัชนีซีเทน และค่าความร้อนเชื้อเพลิง รวมทั้งความบริสุทธิ์หรือองค์ประกอบของชนิดเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) ต่าง ๆ ในน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อให้ทราบถึงผลจากคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาในข้างต้น จึงได้มีการศึกษาพารามิเตอร์ด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์และคุณลักษณะการเผาไหม้ ประกอบด้วย อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค ความดันในกระบอกสูบ อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อน และการตรวจสอบปริมาณการปล่อยมลพิษไอเสีย ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และควันดำ จากการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ จากผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

#### 4.2 การผลิตและผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล คือ น้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว และน้ำมันมะพร้าว ซึ่งจากการสืบค้นพบว่าน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 846.94 กรัม/โมล (Yli-Jokipii et al., 2002), 868.05 กรัม/โมล (Sinha et al., 2008), 661.67 กรัม/โมล (National Center for Biotechnology Information., 2020) ตามลำดับและใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีการกำหนดอัตราส่วน โมลเมทานอลต่อน้ำมันแต่ละชนิดแตกต่างกัน ตามการสืบค้นข้อมูลพบว่า ในน้ำมันปาล์มและมะพร้าวใช้อัตราส่วน โมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 โมล ส่วนน้ำมันรำข้าวใช้ 9:1 โมล เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สมบูรณ์

และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) หนักร้อยละ 1 ของ น้ำหนักน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และในขั้นตอนการแยกชั้นของน้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอลนั้น เมื่อเกิดการแยกชั้นน้ำมันไบโอดีเซลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่ากลีเซอรอลจะลอยอยู่ด้านบนเหนือ กลีเซอรอลสามารถมองเห็นการแยกชั้นได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า แล้วนำผลผลิตเฉพาะน้ำมันไบโอดีเซลมาคำนวณหาเป็นร้อยละการเกิดน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะแสดง ดังตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 การคำนวณหาค่าร้อยละของการเกิดน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ จากสมการที่ 4.1 คือ ในการทดลองทั้ง 9 ครั้ง จะได้ผลการทดลองออกมาเป็นปริมาณของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม ราชำว และมะพร้าวจะได้ร้อยละการเกิดน้ำมันเฉลี่ย 96.36, 89.39 และ 90.28 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล (%Y) คือ ปัจจัยที่บ่งบอกถึงจำนวนผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจริง ( $Y_{act}$ ) เปรียบเทียบกับผลผลิตไบโอดีเซลตามทฤษฎี ผลผลิตไบโอดีเซลเชิงทฤษฎี ( $Y_{th}$ ) และเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอดีเซล (% Y) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Y_{th} = \frac{N \times MW_{FAME} \times m_{crude\ oil}}{MW_{crude\ oil}} \quad (4.1)$$

$$\%Y_{th} = \frac{Y_{act}}{Y_{th}} \quad (4.2)$$

โดยที่	$Y_{th}$	คือ ผลตอบแทนทางทฤษฎีของไบโอดีเซล (g)
	N	คือ จำนวน โมลของไบโอดีเซลต่อจำนวน โมลของน้ำมันพืชดิบ
	$m_{crude\ oil}$	คือ มวลน้ำมันพืชดิบ (g)
	$MW_{FAME}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันเมทิลเอสเทอร์ (g/mol)
	$MW_{crude\ oil}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันพืชดิบ (g/mol)

ตารางที่ 4.1 ผลการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ครั้งที่	น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน (กรัม/โมล)	น้ำมันปาล์ม		เมทานอล		โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	Y <sub>act</sub> (กรัม)	Y <sub>th</sub> (กรัม)	%Yield
		กรัม	โมล	กรัม	โมล				
1	846.94	4000	4.722	917.4	28.63	40	3912.200	4046.624	96.678
2	846.94	4000	4.722	917.4	28.63	40	3865.180	4046.624	95.516
3	846.94	4000	4.722	917.4	28.63	40	3921.500	4046.624	96.908
รวม	-	12000	14.166	2752.2	85.90	120	11698.880	12139.873	96.367
ครั้งที่	น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน (กรัม/โมล)	น้ำมันรำข้าว		เมทานอล		โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	Y <sub>act</sub> (กรัม)	Y <sub>th</sub> (กรัม)	%Yield
		กรัม	โมล	กรัม	โมล				
1	868.05	4000	4.608	1328.77	41.47	40.00	3698.870	4004.064	92.378
2	868.05	5000	5.76	1661	51.84	50.00	4377.340	5005.080	87.458
3	868.05	4650	5.357	1340.951	41.85	46.50	4112.020	4654.725	88.341
รวม	-	13650	15.725	4330.721	135.16	136.50	12188.230	13663.869	89.392
ครั้งที่	น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน (กรัม/โมล)	น้ำมันมะพร้าว		เมทานอล		โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	Y <sub>act</sub> (กรัม)	Y <sub>th</sub> (กรัม)	%Yield
		กรัม	โมล	กรัม	โมล				
1	661.67	5000	7.5566	1452.688	45.34	50.00	4656.190	5143.803	90.520
2	661.67	2965	4.482	861.62	26.89	29.65	2768.270	3050.275	90.755
3	661.67	3632	5.4893	1055.263	32.94	36.32	3346.580	3736.458	89.566
รวม	-	11597	17.5279	3369.571	105.17	115.97	10771.040	11930.536	90.280

หลังจากได้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ POB100, RBB100 และ COB100 โดยใช้ปฏิกิริยากระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแล้ว ลำดับถัดไปนั้น จะนำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด ที่ได้มาจะถูกแบ่งออกเป็นบางส่วนสำหรับเป็นน้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลมาตรฐานในสัดส่วน 20% และ 40% ซึ่งจะเป็นน้ำมัน B20 และ B40 ดังนั้น เมื่อนำไบโอดีเซลทั้ง 3 ชนิด มาผสมกับดีเซลมาตรฐานเราจะได้น้ำมันเชื้อเพลิง POB20, POB40, RBB20, RBB40, COB20 และ COB40 ดังในตารางที่ 4.2 โดยจะใช้เครื่องมือเขย่าอัลตราโซนิก (Ultrasonic Shaker) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้การผสมน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนในการผสมน้ำมันประเภทต่าง ๆ

ประเภทน้ำมันเชื้อเพลิง	สัดส่วนโดยปริมาตร(มิลลิเมตร)		
	น้ำมันดีเซล	น้ำมันไบโอดีเซล	รวมเป็น
POB100	0	1,000	1,000
POB20	800	200	1,000
POB40	600	400	1,000
RBB100	0	1,000	1,000
RBB20	800	200	1,000
RBB40	600	400	1,000
COB100	0	1,000	1,000
COB20	800	200	1,000
COB40	600	400	1,000

#### 4.2.1 การหาค่าความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล

หลังจากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์ม ไร่ข้าว และมะพร้าว เพื่อที่จะทราบถึงความแตกต่างขององค์ประกอบกรดไขมันของไบโอดีเซลที่ผลิตจากพืชต่างชนิดกันจะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันอย่างไร โดยการทดสอบนี้ก็จะทำให้เราทราบถึงค่าความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งในการทดสอบใช้เครื่องมือเรียกว่า “โครมาโทกราฟี (Chromatography)” ภายใต้มาตรฐาน EN 14103 ซึ่งในการทดลองนี้โครมาโทกราฟีที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่อาคารเครื่องมือ 10 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นแบบแก๊ส (Gas Chromatography, GC) ใช้

สำหรับแยกสารผสมที่เป็นแก๊ส โดยมีเฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สเช่นกันแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารผสม โดยมีสารละลายเมทิล-เฮปทาดีเคโนเอต (Methyl-heptadecanoate) ทำหน้าที่เป็นตัวพา (Carrier) สารผสม ส่วนเฟสอยู่กับที่อาจเป็นของแข็งหรือของเหลวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ เมื่อทั้งตัวพาและสารผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นี้ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จึงถูกด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ตามความเป็นขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน สารผสมถูกแยกออกจากกันนั่นเอง

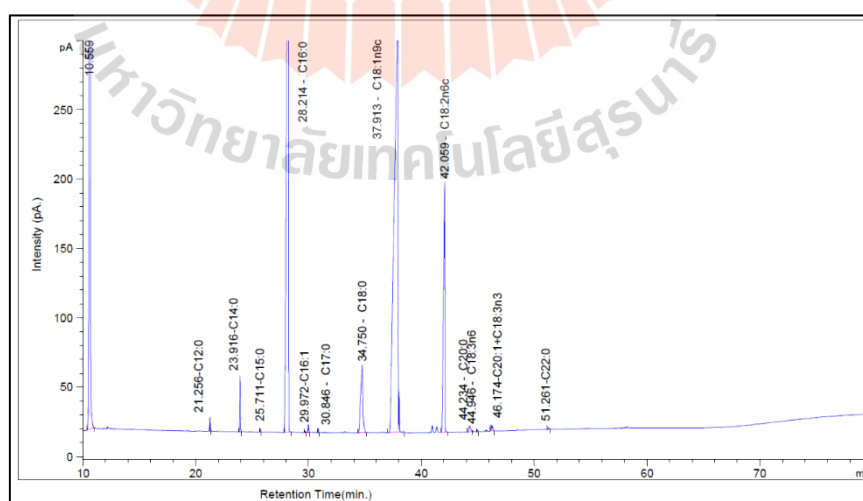
ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันไบโอดีเซล มีตัวแปรต้น คือ ประเภทของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม (POB100) น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว (RBB100) และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว (COB100) ตัวแปรควบคุม คือ การวัดค่าความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล ทั้ง 3 ประเภท ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี โดยมีเมทิล-เฮปทาดีเคโนเอตเป็นสารละลายที่ใช้ในการวัด และสุดท้ายตัวแปรตาม คือ กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 3 ประเภท

สำหรับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันประเภทต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบหลัก ดังตารางที่ 4.3 จากกรดไขมันประเภทต่าง ๆ ในตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 นั้น เมื่อทำการทดลองหาองค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม (POB100) ด้วยวิธีการโครมาโทกราฟี ซึ่งเป็นแบบแก๊สโครมาโทกราฟีพบว่า องค์ประกอบต่าง ๆ ออกมาในลักษณะเป็นจุดยอดสูงสุดของกราฟ (Peak) แสดงถึงประเภทของกรดไขมันที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งกรดไขมันที่ได้จากไบโอดีเซลปาล์ม (POB100) มีองค์ประกอบหลักด้วยอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ Palmitic acid 39.18%, Oleic acid 43.88%, Linoleic acid 10.57% และในรูปที่ 4.2 แสดงถึงกรดไขมันที่ได้ของไบโอดีเซลรำข้าว (RBB100) มีองค์ประกอบหลักด้วยอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ Palmitic acid 20.44%, Oleic acid 40.25%, Linoleic acid 33.26% ในรูปที่ 4.3 แสดงถึงกรดไขมันที่ได้จากน้ำมันไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) มีองค์ประกอบหลักด้วยอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ Lauric acid 47.52%, Myristic acid 18.37% และ Palmitic acid 9.24%

จากการคำนวณเพื่อหามวลโมเลกุลของ POB100, RBB100 และ COB100 มีค่าเท่ากับ 285.604, 289.64 และ 226.90 กรัม/โมล ตามลำดับ และพบกรดไขมันของมวลน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง 74.39%, 70.65% และ 75.85% ตามลำดับ และต่ำกว่ามาตรฐาน 22.11%, 25.85%, 20.65% ตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง การกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556 ควรมีค่าเมทิลเอสเทอร์ไม่ต่ำกว่า 96.5% โดยน้ำหนัก ตามวิธีทดสอบ EN14103

ตารางที่ 4.3 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

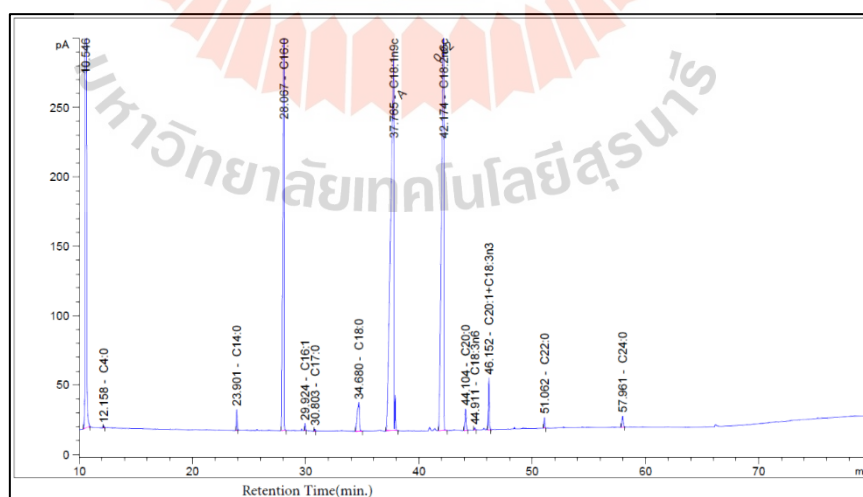
Peak NO	Retention Time	Name	C No. : Dbl.Bnd	Molecular Weight	%FAME
1	21.256	Lauric acid	C12:0	214.351	0.21
2	23.916	Myristic acid	C14:0	242.405	0.90
3	25.711	Pentadecanoic acid	C15:0	256.432	0.04
4	28.214	Palmitic acid	C16:0	270.459	39.18
5	29.972	Palmitoleic acid	C16:1	268.459	0.18
6	30.846	Heptadecanoic acid	C17:0	284.486	0.16
7	34.75	Stearic acid	C18:0	298.513	4.25
8	37.913	Oleic acid	C18:1n9c	296.513	43.88
9	42.059	Linoleic acid	C18:2n6c	294.513	10.57
10	44.234	Arachidic acid	C20:0	326.567	0.29
11	44.946	$\gamma$ -Linolenic acid	C18:3n6	292.513	0.05
12	46.174	Henicosanoic acid	C20:1+C18:3n3	324.567	0.22
13	51.261	Behenic acid	C22:0	354.621	0.05



รูปที่ 4.1 Gas chromatograph profiles ของน้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม (POB100)

ตารางที่ 4.4 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว

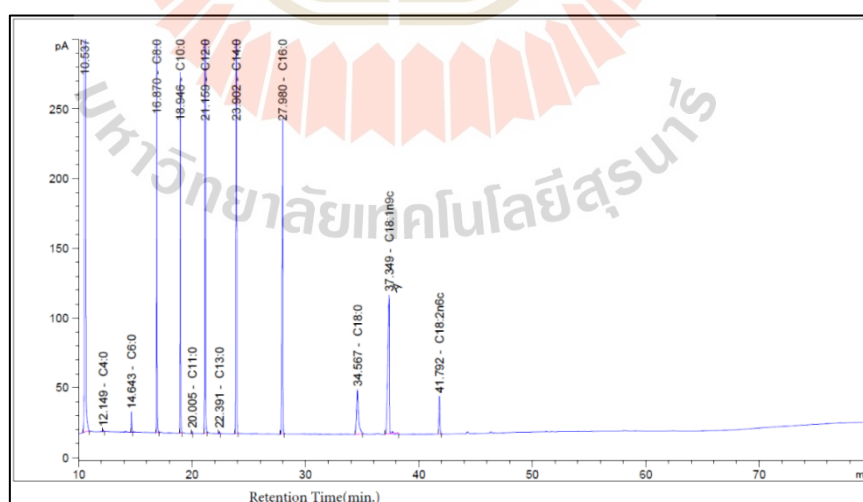
Peak NO	Retention Time	Name	C No. : Dbl.Bnd	Molecular Weight	%FAME
1	23.901	Myristic acid	C14:0	242.405	0.41
2	28.067	Palmitic acid	C16:0	270.459	20.44
3	29.924	Palmitoleic acid	C16:1	268.459	0.20
4	30.803	Heptadecanoic acid	C17:0	284.486	0.08
5	34.68	Stearic acid	C18:0	298.513	2.10
6	37.765	Oleic acid	C18:1n9c	296.513	40.25
7	42.174	Linoleic acid	C18:2n6c	294.513	33.26
8	44.104	Arachidic acid	C20:0	326.567	0.85
9	44.911	$\gamma$ -Linolenic acid	C18:3n6	292.513	0.07
10	46.152	Henicosanoic acid	C20:1+C18:3n3	324.567	1.57
11	51.062	Behenic acid	C22:0	354.621	0.28
12	57.961	Lignoceric acid	C24:0	382.675	0.44



รูปที่ 4.2 Gas chromatograph profiles ของน้ำมันไบโอดีเซลรำข้าว (RBB100)

ตารางที่ 4.5 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว

Peak NO	Retention Time	Name	C No. : Dbl.Bnd	Molecular Weight	%FAME
1	12.149	Butyric acid	C4:0	102.135	0.06
2	14.643	Caproic acid	C6:0	130.189	0.50
3	16.87	Caprylic acid	C8:0	158.243	7.60
4	18.946	Capric acid	C10:0	186.297	6.14
5	20.005	Undecanoic acid	C11:0	200.324	0.03
6	21.159	Lauric acid	C12:0	214.351	47.52
7	22.391	Tridecanoic acid	C13:0	228.378	0.03
8	23.902	Myristic acid	C14:0	242.405	18.37
9	27.98	Palmitic acid	C16:0	270.459	9.24
10	34.567	Stearic acid	C18:0	298.513	2.75
11	37.349	Oleic acid	C18:1n9c	296.513	6.56
12	41.792	Linoleic acid	C18:2n6c	294.513	1.21



รูปที่ 4.3 Gas chromatograph profiles ของน้ำมันไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100)



### 4.3 การวัดและผลคุณสมบัติของน้ำมัน

งานวิจัยนี้วัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ โดยมีตัวแปรต้นจากการวัด คือ ประเภทของน้ำมันที่ทำการวัดคุณสมบัติทั้ง 10 ประเภท ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันไบโอดีเซล จากน้ำมันปาล์ม (POB100), น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว (RBB100), น้ำมันไบโอดีเซล จากน้ำมันมะพร้าว (COB100), น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับดีเซลในสัดส่วน 20:80 %Vol. (POB20, RBB20, COB20), น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับดีเซลในสัดส่วน 40:60 %Vol (POB40, RBB40, COB40)

ตัวแปรควบคุม คือ การวัดคุณสมบัติของน้ำมัน 10 ประเภท ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันไบโอดีเซล จากน้ำมันปาล์ม (POB100), น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว (RBB100), น้ำมันไบโอดีเซล จากน้ำมันมะพร้าว (COB100), น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับดีเซลในสัดส่วน 20:80 %Vol. (POB20, RBB20, COB20), น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับดีเซลในสัดส่วน 40:60 %Vol (POB40, RBB40, COB40) รวมถึงเงื่อนไขจากการวัดคุณสมบัติของน้ำมันในแต่ละประเภท ได้แก่ ความหนืด ทำการวัดความหนืดภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิของน้ำมันตัวอย่างที่ใช้วัดต้องมีอุณหภูมิเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส, ความถ่วงจำเพาะ ทำการวัดความถ่วงจำเพาะ ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิของ น้ำมันตัวอย่างที่ใช้วัดต้องมีอุณหภูมิเท่ากับ 15.6 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 ของ ตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบ ทำการวัดอุณหภูมิการกลั่นภายใต้เงื่อนไขตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบ จะต้องมีปริมาณ 100 มิลลิลิตร และต้องกลั่นตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบออกมาให้ได้ที่ร้อยละ 50 ของตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบหรือปริมาณ 50 มิลลิลิตร, ค่าดัชนีซีเทน เป็นการประมาณค่าออกมา โดยการคำนวณ ซึ่งใช้ข้อมูลจากการวัดค่าความถ่วงจำเพาะ และอุณหภูมิการกลั่นที่ร้อยละ 50 ของตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบในการช่วยประมาณค่าดัชนีซีเทนออกมา และค่าความร้อนของ เชื้อเพลิง ทำการวัดภายใต้เงื่อนไขปริมาณของน้ำมันตัวอย่างมีน้ำหนักอยู่ที่ 0.25 กรัม โดยการวัด คุณสมบัติของน้ำมันทั้ง 10 ประเภทอยู่ภายใต้มาตรฐาน American Society of Testing and Materials (ASTM)

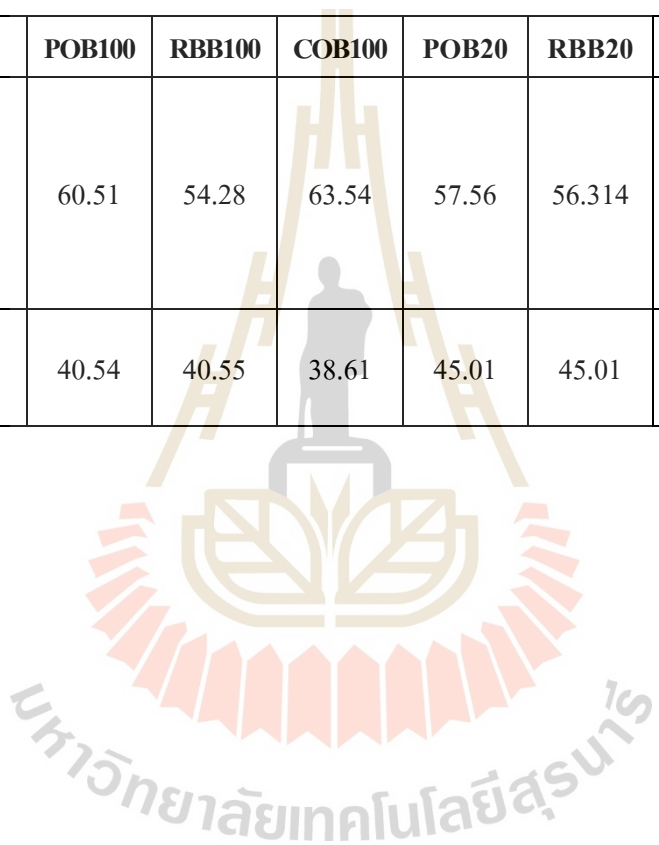
สุดท้ายตัวแปรตาม คือ ผลลัพธ์จากการวัดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 10 ประเภท พบว่า คุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นไปตามที่แสดงดังตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.4

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของน้ำมันประเภทต่าง ๆ

คุณสมบัติน้ำมัน เชื้อเพลิง	หน่วย การวัด	มาตรฐาน การทดสอบ	น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ									
			Diesel	POB100	RBB100	COB100	POB20	RBB20	COB20	POB40	RBB40	COB40
ความหนืด จลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	ASTM D445 $1.8 \leq x \leq 8.0$	4.71	5.58	5.76	3.62	4.90	5.24	4.53	5.27	5.29	4.27
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6°C	-	ASTM D1298 $0.81 \leq x \leq 0.92$	0.830	0.870	0.871	0.867	0.840	0.840	0.839	0.848	0.848	0.846
ความถ่วงเอพียู	-	ASTM D1298	38.982	31.144	30.957	31.801	36.967	36.907	37.168	35.377	35.280	35.713
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6°C	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D1298 $860 \leq x \leq 900$	830.075	870.078	871.078	866.578	840.003	840.301	839.003	848.004	848.502	846.303
จุดวาบไฟ	°C	ASTM D93 $x \geq 120$	59.33	154	159.6	104.666	70	72	60.2	71.6667	74	66.1429
อุณหภูมิการกลั่น ที่ 50%	°C	ASTM D86	281	336	342	279	295	296	281	306	308	280

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของน้ำมันประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

คุณสมบัติ น้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วย การวัด	มาตรฐาน การทดสอบ	น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ									
			Diesel	POB100	RBB100	COB100	POB20	RBB20	COB20	POB40	RBB40	COB40
ดัชนีซีเทน	-	ASTM D976 and Klopfenstein $x \geq 45$	56.82	60.51	54.28	63.54	57.56	56.314	58.297	58.297	55.805	59.509
ค่าความร้อน เชื้อเพลิง	kJ/kg	ASTM D240	46.49	40.54	40.55	38.61	45.01	45.01	44.56	43.82	43.82	42.98



ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบร้อยละการเพิ่มขึ้น-ลดลงของคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (ใช้น้ำมันดีเซลเป็นมาตรฐาน)

คุณสมบัติ น้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วย การวัด	มาตรฐาน การทดสอบ	น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ									
			Diesel	POB100	RBB100	COB100	POB20	RBB20	COB20	POB40	RBB40	COB40
ความหนืด จลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	ASTM D445	4.71	+15.52%	+18.21%	-30.13%	+3.85%	+10.15%	-3.89%	+10.60%	+11%	-10.20%
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6°C	-	ASTM D1298	0.830	+4.60%	+4.71%	+4.21%	+1.18%	+1.22%	+1.06%	+2.11%	+2.17%	+1.92%
ความถ่วงเอ ไฟโอ	-	ASTM D1298	38.982	-25.17%	-25.92%	-22.58%	-5.45%	-5.62%	-4.88%	-10.19%	-10.49%	-9.15%
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D1298	830.075	+4.60%	+4.71%	+4.21%	+1.18%	+1.22%	+1.06%	+2.11%	+2.17%	+1.92%
จุดวาบไฟ	°C	ASTM D93	59.33	+61.47%	+62.83%	+43.31%	+15.24%	+17.60%	+1.45%	+17.21%	+19.82%	+10.30%

หมายเหตุ + คือ เพิ่มขึ้น - คือ ลดลง

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบร้อยละการเพิ่มขึ้น-ลดลงของคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล (ใช้น้ำมันดีเซลเป็นมาตรฐาน) (ต่อ)

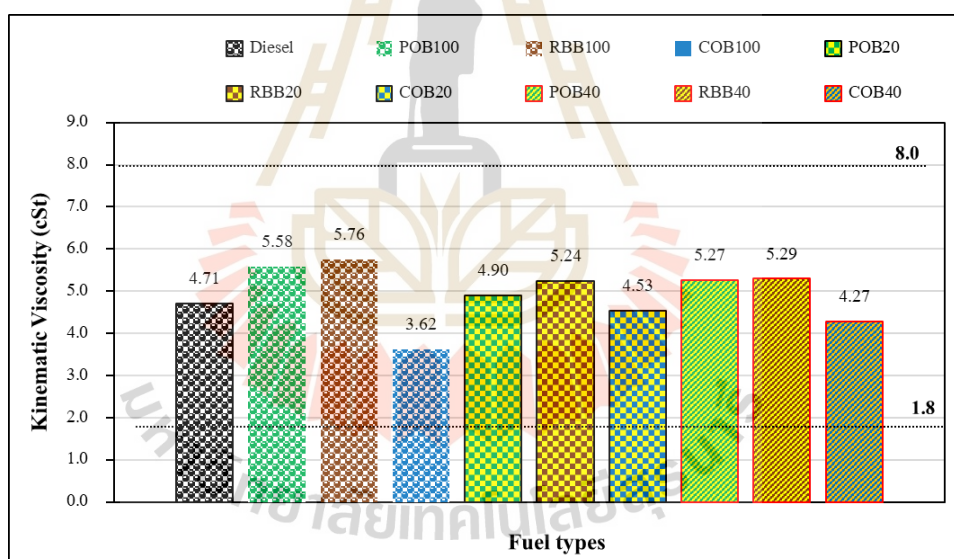
คุณสมบัติ น้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วย การวัด	มาตรฐาน การทดสอบ	น้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ									
			Diesel	POB100	RBB100	COB100	POB20	RBB20	COB20	POB40	RBB40	COB40
อุณหภูมิการ กลั่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์	°C	ASTM D86	281	+16.37 %	+17.84 %	-0.72%	+4.63%	+5.14%	-0.17%	+8.06%	+8.89%	-0.32%
ดัชนีซีเทน	-	ASTM D976 and Klopfenstei n	56.82	+6.10%	-4.68%	+10.58%	+1.28%	-0.90%	+2.31 %	+2.53%	-1.82%	+4.52%
ค่าความร้อน เชื้อเพลิง	kJ/kg	ASTM D240	46.49	-14.67%	-14.65%	-20.41%	-3.28%	-3.30%	-4.33%	-6.09%	-6.10%	-8.16%

### 4.3.1 ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity)

การวัดค่าความหนืดจลศาสตร์ภายใต้มาตรฐาน ASTM D445 โดยนำน้ำมันมาวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้หลอดทดลองวัดความหนืดขนาดเบอร์ 100 และมีค่าคงที่ของหลอดทดลองเท่ากับ  $0.01401 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  ทำการวัดโดยการจับเวลาเพื่อสังเกตว่าน้ำมันไหลจากจุดอ้างอิงเริ่มต้นจนไปถึงจุดอ้างอิงสุดท้ายของหลอดทดลองวัดความหนืดที่เวลาที่วินาที จากนั้นจึงนำเวลาที่ได้นำมาคูณค่าความหนืดด้วยสมการที่ 4.5

$$\text{Viscosity (cSt)} = T_{\text{การไหลของน้ำมัน}} (\text{s}) \times 0.01401 (\text{mm}^2/\text{s}^2) \quad (4.5)$$

ซึ่งจากการทดลองวัดค่าความหนืดผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 ค่าความหนืดที่วัดได้จากน้ำมันประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM D445



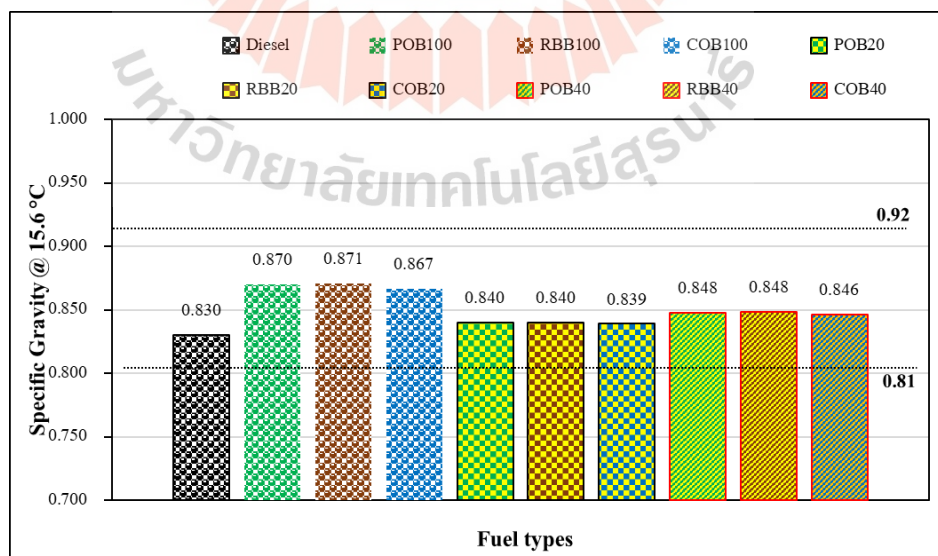
รูปที่ 4.4 ค่าความหนืดจลศาสตร์ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

ความหนืดนั้นมีผลต่อการกระจายตัวเป็นละอองฝอยของน้ำมันเมื่อถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ความหนืดที่เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดการกระจายเป็นฝอย (Atomization) หยดเชื้อเพลิงจะถูกทำให้กระจายเล็ก ๆ ยิ่งหัวฉีดฉีดเชื้อเพลิงออกมาเป็นหยดเล็กเพียงใด การกระจายเป็นฝอยก็จะยิ่งรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพียงนั้น (Willard W.Pulkrabek 1997) และซึ่งเป็นต้นทางที่จะทำให้เกิดการระเหยเป็นไอ (Vaporization) การผสม (Mixing) และ

การลุกไหม้ (Self- Ignition) ได้ดี ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จากตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงในด้านความหนืดของไบโอดีเซล (B100) เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า RBB100 และ POB100 มีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล 18.21%, 15.52% ตามลำดับ มีเพียงน้ำมันไบโอดีเซลจากมะพร้าว COB100 ที่มีความหนืดต่ำกว่าดีเซล 30.13% ดังนั้นในกลุ่มของ B100 เชื้อเพลิง COB100 จะมีแนวโน้มของประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดีที่สุด ถัดมาจะเป็นเชื้อเพลิงดีเซล POB100 และ RBB100 และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลกับดีเซลผสม (B40, B20) กลุ่มที่มีความหนืดสูงเกินกว่าดีเซล คือ RBB40, POB40, RBB20, POB20 ซึ่งสูงกว่าน้ำมันดีเซล 11.00%, 10.60%, 10.15%, 3.87% ตามลำดับ กลุ่มน้ำมันไบโอดีผสมที่มีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ได้แก่ COB40, COB20 มีค่าเท่ากับ 10.20% และ 3.89%

### 4.3.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

การวัดค่าความถ่วงจำเพาะภายใต้มาตรฐาน ASTM D1298 โดยนำน้ำมันมาวัดหาค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ในการวัดหาค่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งไฮโดรมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดนั้น มีความละเอียดในการวัดอยู่ที่ 0.005 และเป็นค่าที่ไม่มีหน่วยใช้วิธีในการวัดโดยใส่ไฮโดรมิเตอร์ลงไปนํ้ามันที่ถูกใส่ไว้ในกระบอกตวงก่อนหน้านั้น แล้วสังเกตสเกล (Scale) อ่านค่าของไฮโดรมิเตอร์ที่ลอยอยู่ตรงกับระดับผิวของน้ำมัน และทำการอ่านค่าที่วัดได้จากน้ำมันประเภทต่าง ๆ ซึ่งจากการทดลองวัดค่าความถ่วงจำเพาะผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



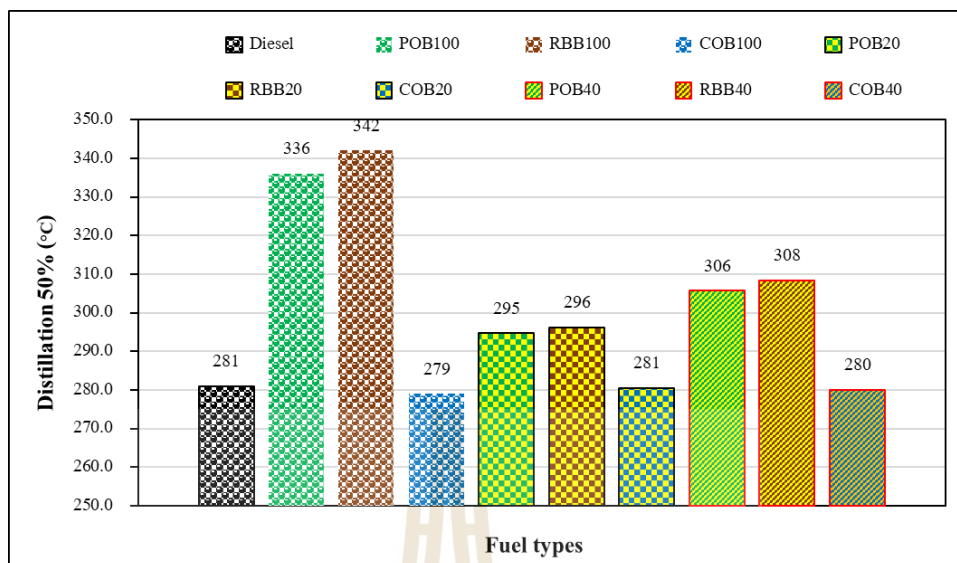
รูปที่ 4.5 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG) คือ อัตราความหนาแน่นของสารต่อความหนาแน่นของน้ำหนักบริสุทธิ์ที่มีปริมาตรเท่ากันและที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D1298 ซึ่งเป็นการวัดความหนักเบาของน้ำมันที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ถ้าน้ำมันหนักมากค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักจะลดลง ค่าซีเทนจะลดลงทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพลดลง และเกิดเป็นเขม่าคาร์บอนสะสมได้มาก หากเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นสูง อัตราการไหลโดยมวลของน้ำมันก็จะสูงขึ้น ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่มากขึ้นตามไปด้วย จากตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 พบว่าผลการทดสอบการเปรียบเทียบน้ำมันไบโอดีเซล (B100) น้ำมันดีเซลผสม (B40, B20) กับน้ำมันดีเซล เชื้อเพลิงทุกชนิดมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยเรียงจากเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนสูงกว่าน้ำมันดีเซลมากที่สุดไปน้อยที่สุด ได้แก่ RBB100 4.71%, POB100 4.60%, COB100 4.21%, RBB40 2.17%, POB40 2.11%, COB40 1.92%, RBB20 1.22%, POB20 1.18% และ COB20 1.06% ซึ่งจากคุณสมบัตินี้จะมีแนวโน้มให้อัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงโดยมวลน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันดีเซลตามค่าความถ่วงจำเพาะสูงที่กว่าตามลำดับ

#### 4.3.3 อุณหภูมิการกลั่นที่ 50% ของตัวอย่างน้ำมัน (Distillation at 50% recovered)

การวัดอุณหภูมิการกลั่นภายใต้มาตรฐาน ASTM D86 ซึ่งเป็นการวัดอุณหภูมิของการกลั่นของน้ำมันตัวอย่างที่ร้อยละ 50 ของปริมาณน้ำมันตัวอย่าง โดยใช้น้ำมันตัวอย่างในการทดสอบที่ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่น้ำมันตัวอย่างเริ่มกลั่นตัวในการทดสอบมีการกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบคือ อัตราการไหลของน้ำมันที่กลั่นออกมาได้มีค่าอยู่ระหว่าง 4-5 มิลลิลิตร/นาที่ โดยในการทดสอบนั้น ทำการจับเวลาในการกลั่นน้ำมันในแต่ละช่วง ได้แก่ การกลั่นจนได้น้ำมันหยดแรกไปจนถึงกลั่นได้น้ำมันปริมาณ 10 มิลลิลิตร, กลั่นได้น้ำมันปริมาณ 10 มิลลิลิตร จนถึง 20 มิลลิลิตร, กลั่นได้น้ำมันปริมาณ 20 มิลลิลิตร จนถึง 30 มิลลิลิตร, กลั่นได้น้ำมันปริมาณ 30 มิลลิลิตร จนถึง 40 มิลลิลิตร และกลั่นได้น้ำมันปริมาณ 40 มิลลิลิตร จนถึง 50 มิลลิลิตร ซึ่งแต่ละช่วงของการกลั่นต้องควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันที่กลั่นออกมาด้วยการจับเวลาให้อยู่ในช่วง 2-2.30 นาที และทำการอ่านค่าอุณหภูมิในแต่ละช่วงจากเทอร์โมมิเตอร์ แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดแสดงดังรูปที่ 4.6



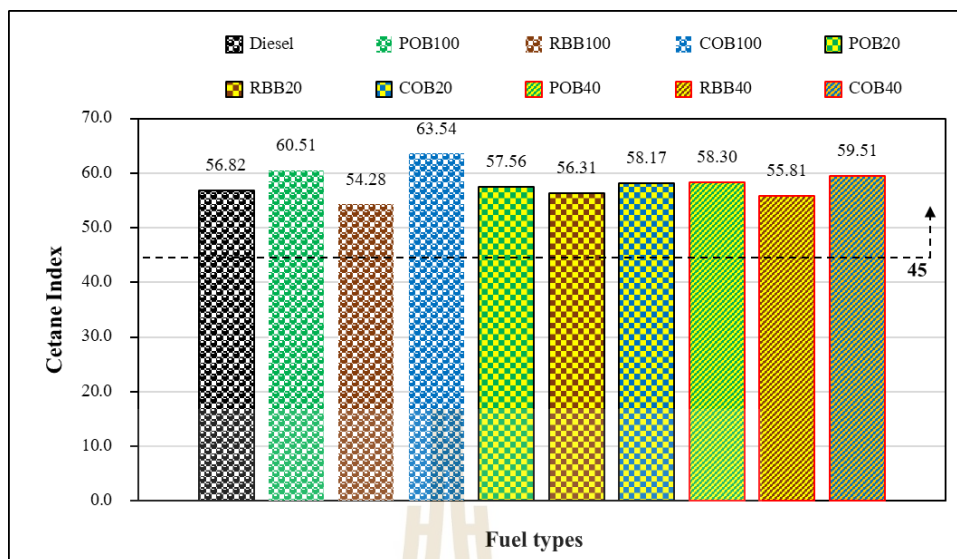


รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการกลั่นที่ 50% ของตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

จากตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิการกลั่นที่ 50% ของน้ำมันไบโอดีเซล (B100) และน้ำมันดีเซลผสม (B40, B20) กับน้ำมันดีเซล พบว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าอุณหภูมิการกลั่นที่ 50% สูงกว่าได้แก่ RBB100 17.84% , POB100 16.37% , RBB40 8.89%, POB40 8.06%, RBB20 5.14% และ POB20 4.63 แต่สำหรับกลุ่มของน้ำมันไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100, COB20, COB40) มีค่าต่ำกว่า 0.72%, 0.17%, 0.32% ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิการกลั่นที่ 50% ของน้ำมันนั้น ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้เครื่องยนต์ร้อนขึ้นได้เร็ว มีการกระจายตัวของน้ำมันไปยังสูบต่าง ๆ ได้สม่ำเสมอจนช่วยให้เร่งเครื่องได้เรียบอุณหภูมิการกลั่นตัวที่ 50% เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีซีเทน (Cetane Index) หากมีค่าสูงก็จะทำให้ค่าดัชนีซีเทน (Cetane Index) สูงขึ้นตามไปด้วย

#### 4.3.4 ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

การหาค่าดัชนีซีเทนภายใต้มาตรฐาน ASTM D976 สำหรับเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม โดยวัดค่าความถ่วงจำเพาะ API ตามมาตรฐาน ASTM D1298 และอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันที่ร้อยละ 50 ตามมาตรฐาน ASTM D86 ในส่วนของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลได้ใช้สูตรการคำนวณของ Klopfenstein (1983) เพื่อหาดัชนีซีเทนของเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันพืชต่าง ๆ โดยใช้องค์ประกอบของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันพืชที่ได้จากการใช้เครื่องมือหาค่าประกอบน้ำมันด้วยเครื่อง Gas Chromatography และได้ดัชนีซีเทนใกล้เคียงกว่าสมการ ASTM D976 ทำให้สามารถนำไปคำนวณหาค่าดัชนีซีเทนแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

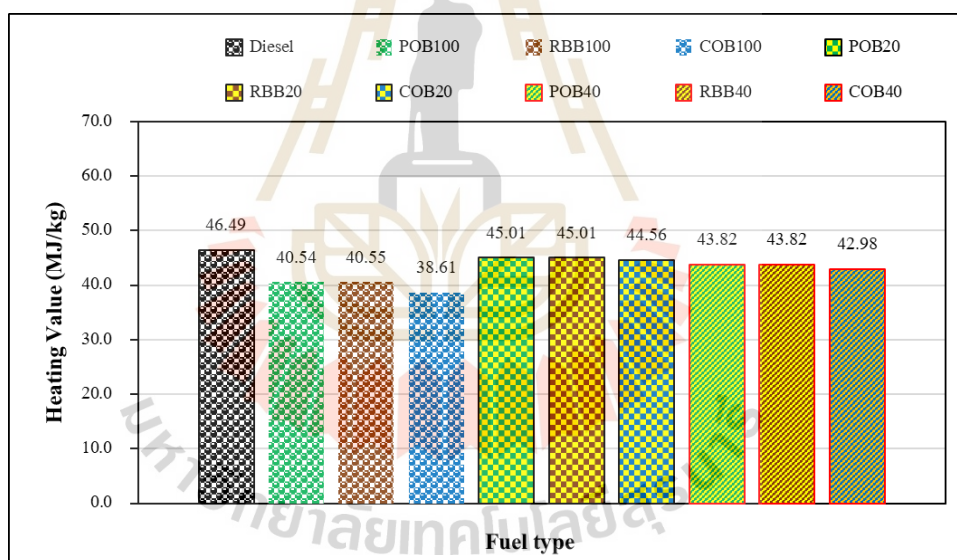
ค่าดัชนีซีเทนบอกถึงความสามารถในการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งหมายถึงคุณภาพการจุดติดไฟของน้ำมันนับตั้งแต่ น้ำมันเริ่มถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จนกระทั่งเกิดเปลวไฟขึ้น ช่วงระยะเวลาที่เรียกว่า “ความล่าช้าในการจุดติดไฟ” (Ignition Delay) น้ำมันที่ทำให้เกิดช่วงระยะเวลานี้สั้นจะมีค่าดัชนีซีเทนที่สูง ทำให้สามารถจุดติดไฟได้ง่าย, เครื่องยนต์สตาร์ทติดได้ง่ายในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำหรืออยู่ในช่วงฤดูหนาว, เครื่องยนต์ร้อนได้เร็วขึ้นโดยไม่เกิดควันขาว แต่ในขณะเดียวกันถ้าดัชนีซีเทนสูงเกินไปก็ส่งผลให้เครื่องยนต์ไม่มีกำลัง และค่าดัชนีซีเทนที่สูงจะส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง

จากตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ผลการทดลองพบว่า ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันทุกประเภทอยู่ภายใต้มาตรฐานว่า ซึ่งน้ำมันกลุ่มไบโอดีเซล (B100) ได้แก่ POB100 และ COB100 มีค่าดัชนีซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล 6.10% และ 10.58% ตามลำดับ แต่สำหรับ RBB100 มีค่าดัชนีซีเทนต่ำกว่าดีเซล 4.68% เนื่องจากองค์ประกอบในน้ำมัน RBB100 มีองค์ประกอบกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนที่สูงและมีจำนวนพันธะคู่ ทำให้เมื่อคำนวณหาค่าดัชนีซีเทนทำให้มีค่าซีเทนต่ำที่สุด ในตรงกันข้ามไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) มีกรดไขมัน (%FAME) โดย 50% แรกที่พบนั้นคือ Caprylic acid (C8:0) 7.60%, Capric acid (C10:0) 6.14% และ Lauric acid (C12:0) 47.52% ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีค่าเอนทัลปีของการระเหยตัว (Enthalpy of vaporization) และเป็นกรดไขมันที่มีค่าดัชนีซีเทนที่สูง ทำให้ COB100 มีค่าซีเทนที่สูงที่สุด เปรียบเทียบน้ำมันดีเซลผสม (B40, B20) กับน้ำมันดีเซล พบว่ามีค่าดัชนีซีเทนมีแนวโน้มตามค่าซีเทนของเชื้อเพลิงที่ใช้ผสมน้ำมันดีเซล

โดยจะมีค่าสูงกว่าดีเซลสำหรับ COB40 4.52%, COB20 2.31%, POB40 2.53% และ POB20 1.28% และสำหรับเชื้อเพลิงผสม RBB40 และ RBB20 มีค่าดัชนีซีเทนต่ำกว่าดีเซล 1.82% และ 0.90% ตามลำดับ

#### 4.3.5 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value)

การวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงภายใต้มาตรฐาน ASTM D240 ใช้เครื่องมือบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ซึ่งค่าความร้อนเชื้อเพลิง หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้น ๆ 1 หน่วยมวลสำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลวหรือ 1 หน่วยปริมาตรสำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เมื่อเผาไหม้หมดอย่างสมบูรณ์ สำหรับการเปรียบเทียบว่าเชื้อเพลิงชนิดใดให้พลังงานความร้อนได้มากกว่ากันสามารถทำได้ โดยนำเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมาต้มน้ำในปริมาตรเท่ากันให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากัน เชื้อเพลิงชนิดใดใช้หมดไปน้อยที่สุด เชื้อเพลิงนั้นจะมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงมากแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

จากตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ผลการทดลองพบว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงของน้ำมัน POB100, RBB100, COB100, POB20, RBB20, COB20, POB40, RBB40 และ COB40 มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 14.67%, 14.65%, 20.41%, 3.28%, 3.30%, 4.33%, 6.09%, 6.10% และ 8.16% ตามลำดับ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงบ่งชี้ถึงพลังงานที่ได้รับจาก

เชื้อเพลิงชนิดนั้น ๆ ในปริมาณหนึ่งหน่วยเท่ากันเมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน โดยที่น้ำมันที่มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมากส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง

#### 4.4 คุณลักษณะการเผาไหม้

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้โดยการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากพืช 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม ไร่ข้าว และมะพร้าว และน้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซลที่อัตราส่วนผสม 20% และ 40% Vol. ได้แก่ POB20, RBB20, COB20, POB40, RBB40, COB20 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบคือ อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันในกระบอกสูบ (Heat release rate and cylinder pressure) และความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) โดยสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

##### 4.4.1 การเปรียบเทียบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

ความดันในกระบอกสูบ จากรูปที่ 4.9 (ค) แสดงความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลาคือหัวของเชื้อเพลิงดีเซลเปรียบเทียบที่โหลด 25, 50, 75 และ 100% ที่อัตราส่วนการอัด 18 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มโหลดความดันเชื้อเพลิงที่โหลดสูงขึ้นจะมีค่าความดันเชื้อเพลิงพีคที่ 2 สูงขึ้นด้วย จึงทำให้มีการฉีดเชื้อเพลิงอีกครั้ง ซึ่งเชื้อเพลิงส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ทำให้อัตราการปล่อยความร้อนในช่วงการเผาไหม้ควบคุมเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามโหลดที่เพิ่มขึ้น และมีความดันสูงสุดเพิ่มขึ้น

ช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด จากรูปที่ 4.19 แสดงความล่าช้าในการจุดระเบิดที่โหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนการอัด 17 และ 18 การเพิ่มโหลดจาก 25% ถึง 75% พบว่า มีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มโหลดอย่างชัดเจน ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลงเนื่องมาจากผลของการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นปริมาณการฉีดที่มีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดลดลงกับภาระที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นตรงในเครื่องยนตระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ซึ่งเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของแก๊สที่ค้างอยู่และอุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิของอากาศ (สารผสมระหว่างอากาศกับแก๊สที่ค้างอยู่) สูงขึ้น (และความดันของสารผสมสูงขึ้นเล็กน้อยด้วย) ที่จังหวะการฉีดจึงทำให้ความล่าช้าลดลง (John B. Heywood, 1998) แต่ในโหลดสูงสุด 100% น้ำมันเชื้อเพลิงหลาย ๆ ชนิดมีแนวโน้มของความล่าช้าในการจุดระเบิดเพิ่มขึ้นยาวนานกว่าโหลด 75% ซึ่งที่โหลด 100% นี้ไม่เป็นไปตามแนวโน้มโหลดอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากการเพิ่มโหลดสูงสุดมีการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศมากเกินไป เพื่อที่จะได้ความล่าช้าในการจุดระเบิดลดลงได้ ยังจำเป็นต้องมีความร้อนและความหนาแน่นของการอัดตัวอากาศมากพอด้วย ดังนั้น ที่อัตราส่วน

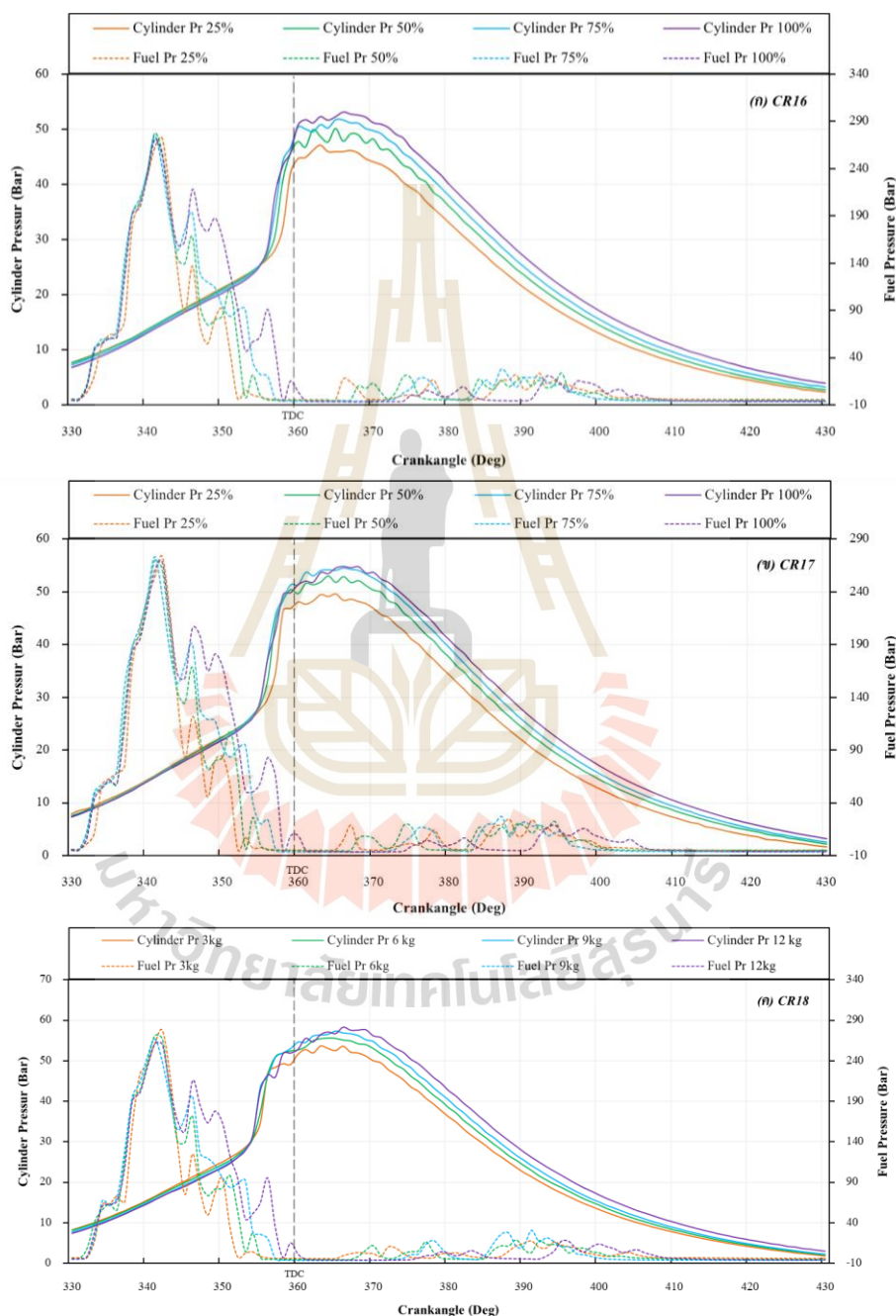
การอัด 16 ที่มีความดันและความเข้มข้นของอากาศในห้องเผาไหม้ต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มโหลดจาก 50% ถึง 100% ของกลุ่มเชื้อเพลิง B100 และน้ำมันดีเซล กลับมีแนวโน้มความล่าช้าในการจุดระเบิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ลดลงตามอัตราส่วนการอัด และความล่าช้าในการจุดระเบิดยาวนานกว่าอัตราส่วนการอัด 17 และ 18 ซึ่งความล่าช้าในการจุดระเบิดมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากโหลดในอัตราส่วนการอัด 17 และ 18 เนื่องจากผลจากปริมาณความร้อนในการอัดตัวไม่เหมาะสมต่อสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่สูงขึ้น

ช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้วหรือช่วงการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Premixed combustion phase หรือ Rapid combustion phase) ในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ได้ผสมกับอากาศเป็นสารผสมที่อยู่ในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งเมื่อเกิดเผาไหม้ก็จะเผาไหม้เกือบพร้อมกัน ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่องศาหมุนข้อเหวี่ยงและเป็นอัตราการปล่อยความร้อนในช่วงนี้สูง จากรูปที่ 4.10 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลาคือข้อเหวี่ยงของเชื้อเพลิงดีเซลทั้ง 4 โหลด พบว่า อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วง Premixed combustion phase จะมีลักษณะการปลดปล่อยความร้อนที่สูงตาม การเพิ่มขึ้นของโหลด 25%, 50% และ 75% ตามปริมาณที่ถูกฉีดเชื้อเพลิงเข้าไป แต่โหลด 100% เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่สัดส่วนที่มากขึ้นทำให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลง จึงมีเชื้อเพลิงในส่วนแรกเริ่มเผาไหม้ไปก่อน ทำให้ที่โหลด 100% จะมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดต่ำกว่าโหลด 75% แต่จะมีระยะเวลาอัตราการปลดปล่อยที่ยาวนานกว่า เนื่องจากการเผาไหม้ในช่วงนี้เป็นช่วงแรกของการเริ่มเผาไหม้ ที่โหลด 100% มีการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่าอาจส่งผลให้เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าผสมกับอากาศในสัดส่วนที่มากเกินไปทำให้การเผาไหม้ในช่วงนี้จะมีค่าต่ำกว่าโหลดที่ฉีดเชื้อเพลิงไปในสัดส่วนที่เหมาะสมกว่าดังในโหลด 50% และ 75%

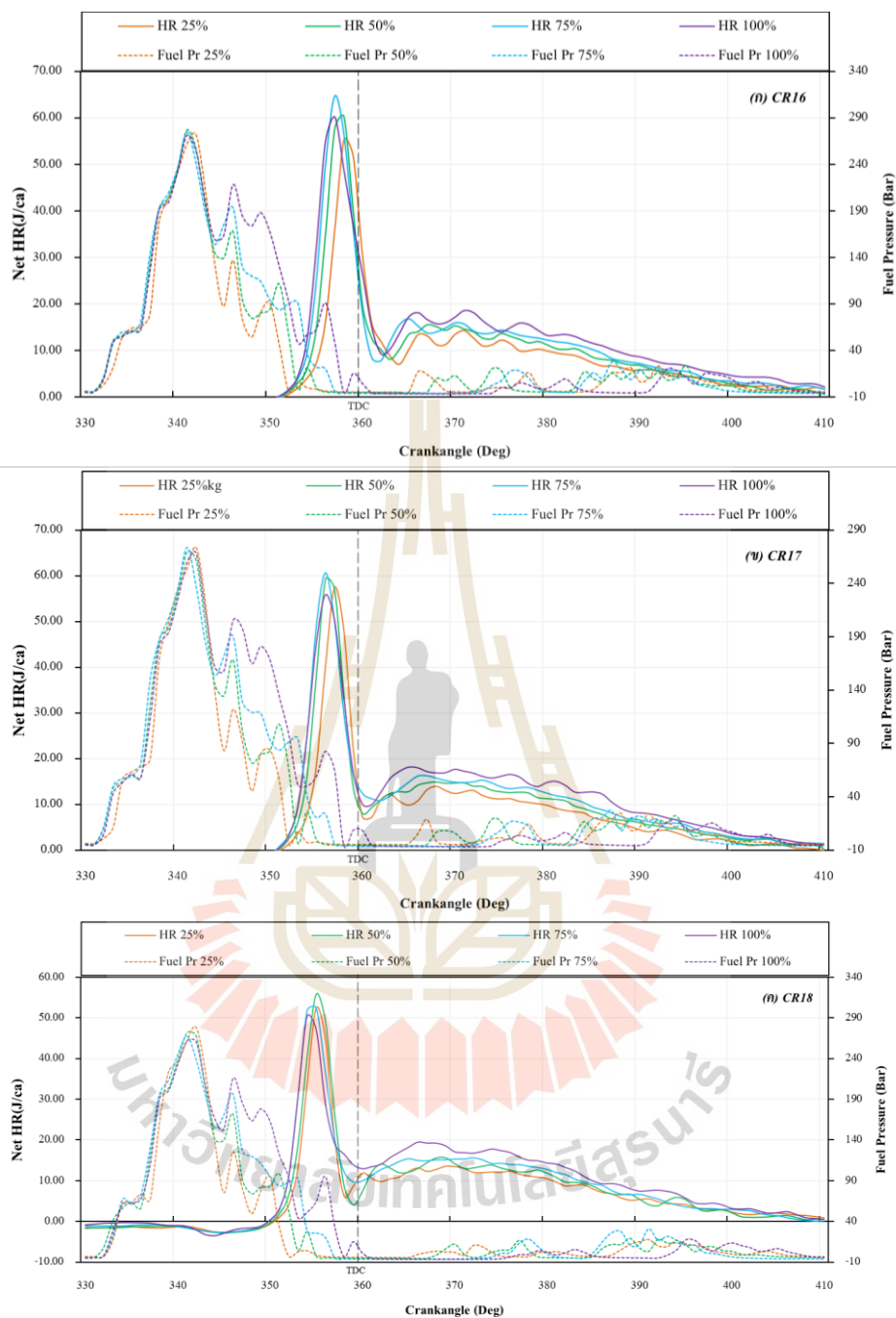
ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) พบว่า อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วงนี้จะเพิ่มตามโหลด เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเพิ่มเข้าไปตามการเพิ่มขึ้นของโหลด ที่โหลดสูงกว่าก็จะมีเชื้อเพลิงเหลือจากการเผาไหม้ในส่วน Premixed combustion phase มากยิ่งขึ้นจึงทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนมากขึ้นตาม โหลด เครื่องยนต์และที่โหลด 100% ปริมาณเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้เผาไหม้จะเริ่มเผาไหม้อย่างรุนแรงมากกว่าโหลดอื่น ๆ ในช่วงนี้ เนื่องจากมีปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเพิ่มขึ้นมาในช่วง 345-350 องศาเพลาคือข้อเหวี่ยง ดังในรูปที่ 4.10 กราฟแรงดันเชื้อเพลิงของโหลด 100%

เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, 390 องศาเพลาคือข้อเหวี่ยงเป็นต้นไป) เป็นช่วงที่การปลดปล่อยความร้อนเกิดขึ้นต่อไปที่อัตราต่ำในจังหวะขยายตัว ซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เล็กน้อย และเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจาก

การเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  ฯลฯ) จากผลการทดลองพบว่า อัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงนี้ค่อนข้างน้อย และเมื่อเปรียบเทียบโหลดต่าง ๆ อัตราการปล่อยความร้อนสูงขึ้นตามโหลดที่เพิ่มขึ้น ดังในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลาคือหัวยิง



รูปที่ 4.10 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยง

#### 4.4.2 การเปรียบเทียบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการอัดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้

จากรูปที่ 4.9 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยงของเชื้อเพลิงดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัดความดันเชื้อเพลิงที่โหลดต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน และความดันในกระบอกสูบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนการอัดที่เพิ่มขึ้น

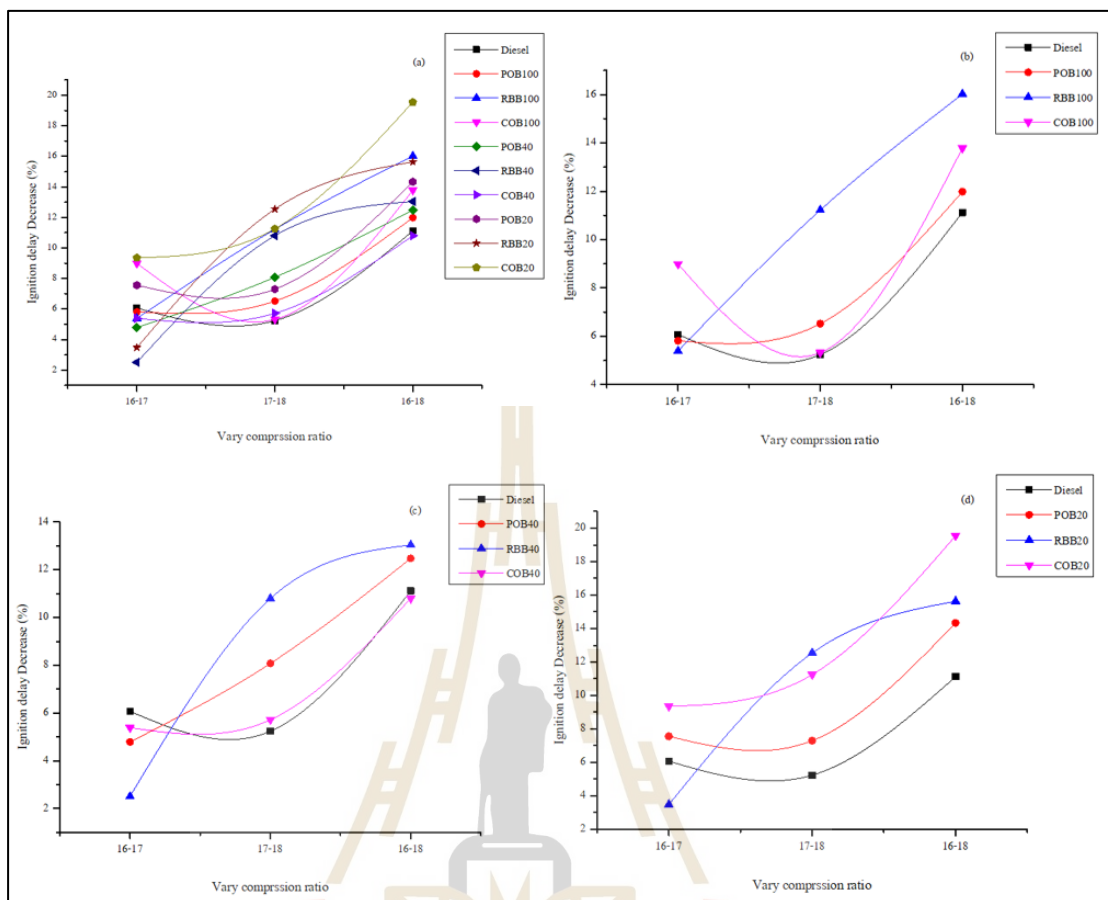
รูปที่ 4.11 (a) แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความล่าช้าในการจุดระเบิดต่อการปรับอัตราส่วนการอัดของเชื้อเพลิง 10 ชนิด การเพิ่มอัตราส่วนการอัดมีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ของน้ำมันทุกชนิดและทุกโหลด มีแนวโน้มลดลง โดยผลจากการปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็นอัตราส่วนการอัด 17 มีความล่าช้าในการจุดระเบิดลดลงเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงทุกโหลด 6.06% โดยเชื้อเพลิงแต่ละชนิดลดลงดังนี้ Diesel 7.27%, POB100 5.81%, RBB100 5.39%, COB100 8.99%, POB40 4.79%, RBB40 2.51%, COB40 5.39%, POB20 7.56%, RBB20 3.48% และ COB20 9.35% ซึ่งในเชื้อเพลิง COB20 มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ลดลง 9.35% และ RBB40 น้อยที่สุดลดลง 2.51% ซึ่งในแต่ละโหลดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดยในปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็นอัตราส่วนการอัด 17 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% มีการเปลี่ยนแปลง 5.08%, 6.10%, 6.09% และ 6.93% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่โหลด 100% เปลี่ยนแปลง 6.93% และน้อยที่สุดในโหลด 25% เปลี่ยนแปลง 5.09 และผลจากการปรับอัตราส่วนการอัด 17 เป็นอัตราส่วนการอัด 18 มีความล่าช้าในการจุดระเบิดลดลงเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงทุกโหลด 8.4% โดยแต่ละเชื้อเพลิงลดลงดังนี้ Diesel 5.24%, POB100 6.52%, RBB100 11.22%, COB100 5.32%, POB40 8.08%, RBB40 10.80%, COB40 5.72%, POB20 7.30%, RBB20 12.54% และ COB20 11.25% ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิง RBB20 เปลี่ยนแปลงมากที่สุดในทุกน้ำมันเชื้อเพลิง 12.54% และ Diesel เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด 5.24% ซึ่งในแต่ละโหลดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดยในปรับอัตราส่วนการอัด 17 เป็นอัตราส่วนการอัด 18 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% มีการเปลี่ยนแปลง 9.12%, 7.32%, 8.90% และ 8.24% ตามลำดับ โหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือโหลด 25% เปลี่ยนแปลง 9.12% และน้อยที่สุดในโหลด 50% เปลี่ยนแปลง 7.32%

ผลรวมจากการปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็นอัตราส่วนการอัด 18 มีความล่าช้าในการจุดระเบิดลดลงเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงและทุกโหลด 13.78% โดยแต่ละเชื้อเพลิงลดลงดังนี้ Diesel 12.22%, POB100 11.98%, RBB100 16.02%, COB100 13.78%, POB40 12.48%, RBB40 13.04%, COB40 10.80%, POB20 14.33%, RBB20 15.63% และ COB20 19.55% ซึ่งเชื้อเพลิง COB20



เปลี่ยนแปลงมากที่สุดในทุกน้ำมันเชื้อเพลิง 19.55% และ COB40 น้อยที่สุด 10.80% ซึ่งในแต่ละโหลคนั้นมีผลในการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดยในปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 ที่โหลค 25%, 50%, 75% และ 100% มีการเปลี่ยนแปลง 13.80%, 12.98%, 14.52% และ 14.62% ตามลำดับ ซึ่งโหลคที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือโหลค 100% เปลี่ยนแปลง 14.62% และน้อยที่สุดในโหลค 50% เปลี่ยนแปลง 12.98% โดยรวมพบว่า ในกรณีที่โหลคสูงสุดน้ำมันเชื้อเพลิง COB100 ได้รับความกระทบมากที่สุด ความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง 23.12% จากการปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 เนื่องจากเชื้อเพลิง COB100 มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงน้อยกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ ซึ่งในกรณีโหลคสูงสุดต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงมากกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งทำให้มีความต้องการพลังงานความร้อนเริ่มเผาไหม้หรือค่าเอนทัลปีของการระเหยตัว (Enthalpy of vaporization) สูงตามไปด้วยการเพิ่มอัตราส่วนการอัดจึงมีผลกระทบต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดมากที่สุดกับเชื้อเพลิง COB100

สรุปผลการเปรียบเทียบผลจากการปรับอัตราส่วนการอัดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าสั้นลง โดยจากการปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 ลดลงเฉลี่ย 13.98% ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้รวมถึงความเข้มข้นของอากาศมากขึ้นเมื่อมีห้องเผาไหม้ที่เล็กลงและมีผลกระทบต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ช้า เช่น RBB100 ให้มีการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากยิ่งขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงถึง 16.02% เป็นผลกระทบสูงที่สุดในกลุ่ม B100 และ COB 20 เปลี่ยนแปลงสูงสุดในทุกเชื้อเพลิง 19.55% โดยรวมแล้วการเพิ่มอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันทุกชนิดอยู่ในช่วงระหว่าง 11.98% ถึง 19.55%



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของความล่าช้าในการจุดระเบิดต่อการปรับอัตราส่วนการอัดของ (a) เชื้อเพลิง 10 ชนิด (b) เชื้อเพลิงดีเซลและไบโอดีเซล(B100) (c) เชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B40) (d) เชื้อเพลิงดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B20)

#### 4.4.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของไบโอดีเซล B100 เทียบกับดีเซล

การปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันไบโอดีเซลจากพีช 3 ชนิด จาก ปาล์ม ไร่ข้าว และมะพร้าวเปรียบเทียบกับดีเซล จากรูปที่ 4.13 ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่โหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 พบว่า น้ำมันไบโอดีเซลปาล์ม (POB100) มีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) สั้นกว่าดีเซล ซึ่งพบว่ามีค่าสั้นกว่า 8.16%, 13.53%, 10.09% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ และสำหรับน้ำมันไบโอดีเซล ไร่ข้าว (RBB100) นั้นมีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่ยาวนานกว่าน้ำมันดีเซล 16.85%, 10.52% และ 9.01% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ และสำหรับน้ำมันไบโอดีเซลมะพร้าว(COB100) นั้นมี ช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay)

ที่สั้นกว่าดีเซล 2.00%, 11.01% และ 6.37% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 16, 17, 18 ตามลำดับ

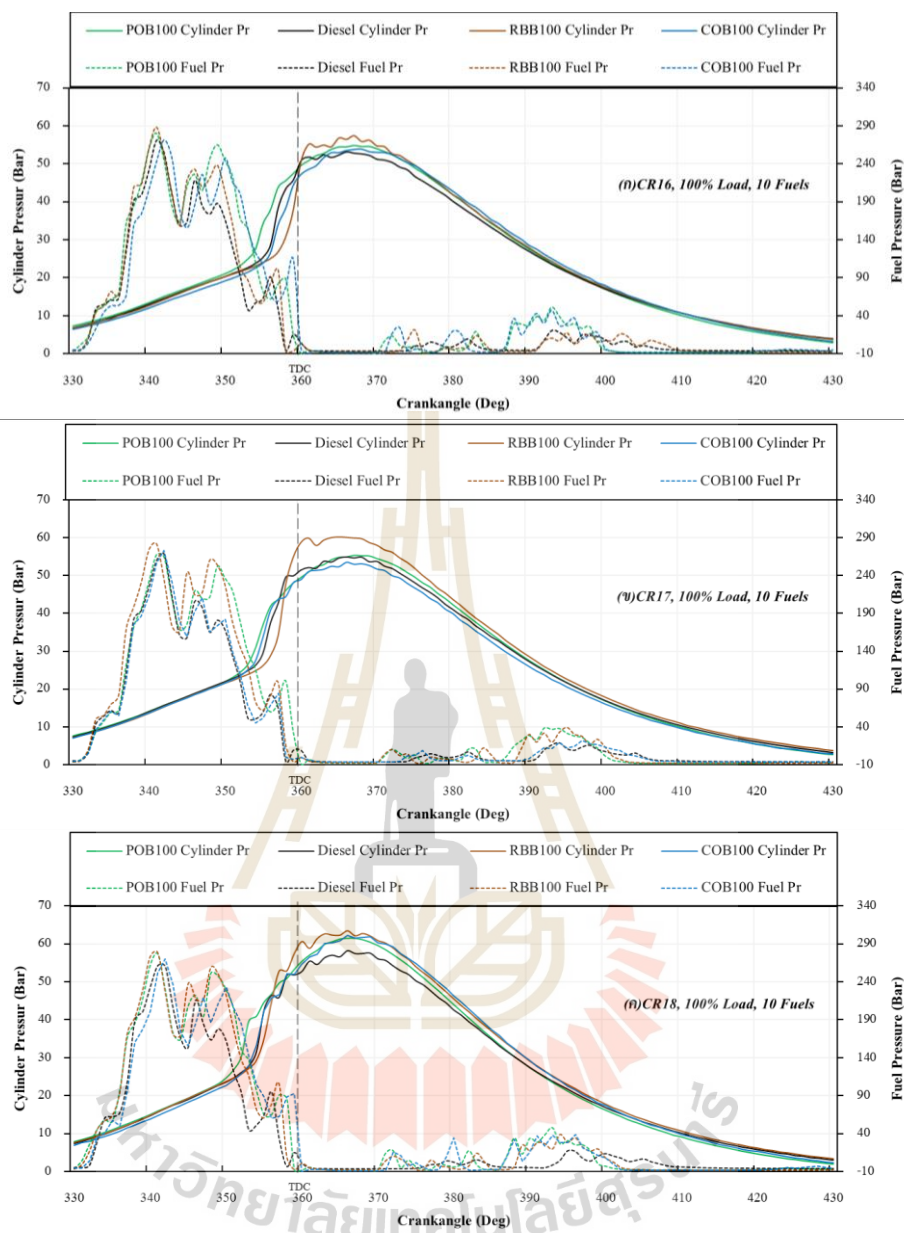
เมื่อพิจารณาในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้วหรือช่วงการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Premixed combustion phase หรือ rapid combustion phase) ในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ได้ผสมกับอากาศเป็นสารผสมที่อยู่ในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งเมื่อเกิดเผาไหม้จะเผาไหม้เกือบพร้อมกัน ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่องศาของมุมข้อเหวี่ยงและเป็นอัตราการปล่อยความร้อนในช่วงนี้สูง จากรูปที่ 4.13 แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล (B100) ที่อัตราส่วนการอัด 18 โดยเมื่อเรียงจากค่ามากไปน้อย พบว่าสูงสุดในน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลรำข้าว (RBB100), น้ำมันดีเซล (Diesel), ไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) และมีค่าต่ำสุดสำหรับไบโอดีเซลจากปาล์ม (POB100) ตามลำดับ น้ำมันรำข้าวมีค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สูงที่สุดในทุกโหลดซึ่งอาจจะเกิดจากกระจุกตัวของน้ำมันในช่วงก่อนหน้าเป็นปริมาณที่สูงทำให้เกิดการระเบิดอย่างรุนแรงในช่วงเวลาอันสั้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความร้อนสูงและอาจเป็นผลให้เกิดมลพิษไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ และเป็นไปตามทฤษฎีที่ขนาดของค่าสูงสุดของกราฟอัตราการปล่อยความร้อนจะขึ้นอยู่กับช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งจะสูงขึ้นเมื่อช่วงล่าช้ายาวขึ้น (John B. Heywood, 1998)

เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) เมื่อเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งผสมกันไว้ก่อนแล้วในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดได้ถูกเผาไหม้หมดไป อัตราการเผาไหม้ (หรืออัตราการปล่อยความร้อน) จะถูกควบคุมโดยอัตราการเกิดสารผสมที่พร้อมเผาไหม้ (อัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ) แต่จะลดลงเมื่อกระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไป ในช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในโหลด 25% และ 50% ของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด มีการเผาไหม้ช่วงนี้ใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันมากขึ้นที่โหลด 75% และ 100% และพบว่าเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากมะพร้าว (COB100) และปาล์ม (POB100) มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงการเผาไหม้นี้สูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าความร้อนที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซลทำให้ระบบเชื้อเพลิงมีการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มเข้าไปในห้องเผาไหม้เป็นค่าความดันเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 2 ดังเส้นกราฟความดันเชื้อเพลิง (Fuel Pressure) ในรูปที่ 4.13 แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลาช้อเหวี่ยงของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล (B100) ที่อัตราส่วนการอัด 18 ซึ่งทำให้ POB100 และ COB100 มีการเผาไหม้ช่วงนี้สูงขึ้นและมากกว่าเชื้อเพลิงดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากรำข้าว (RBB100) มีการเผาไหม้

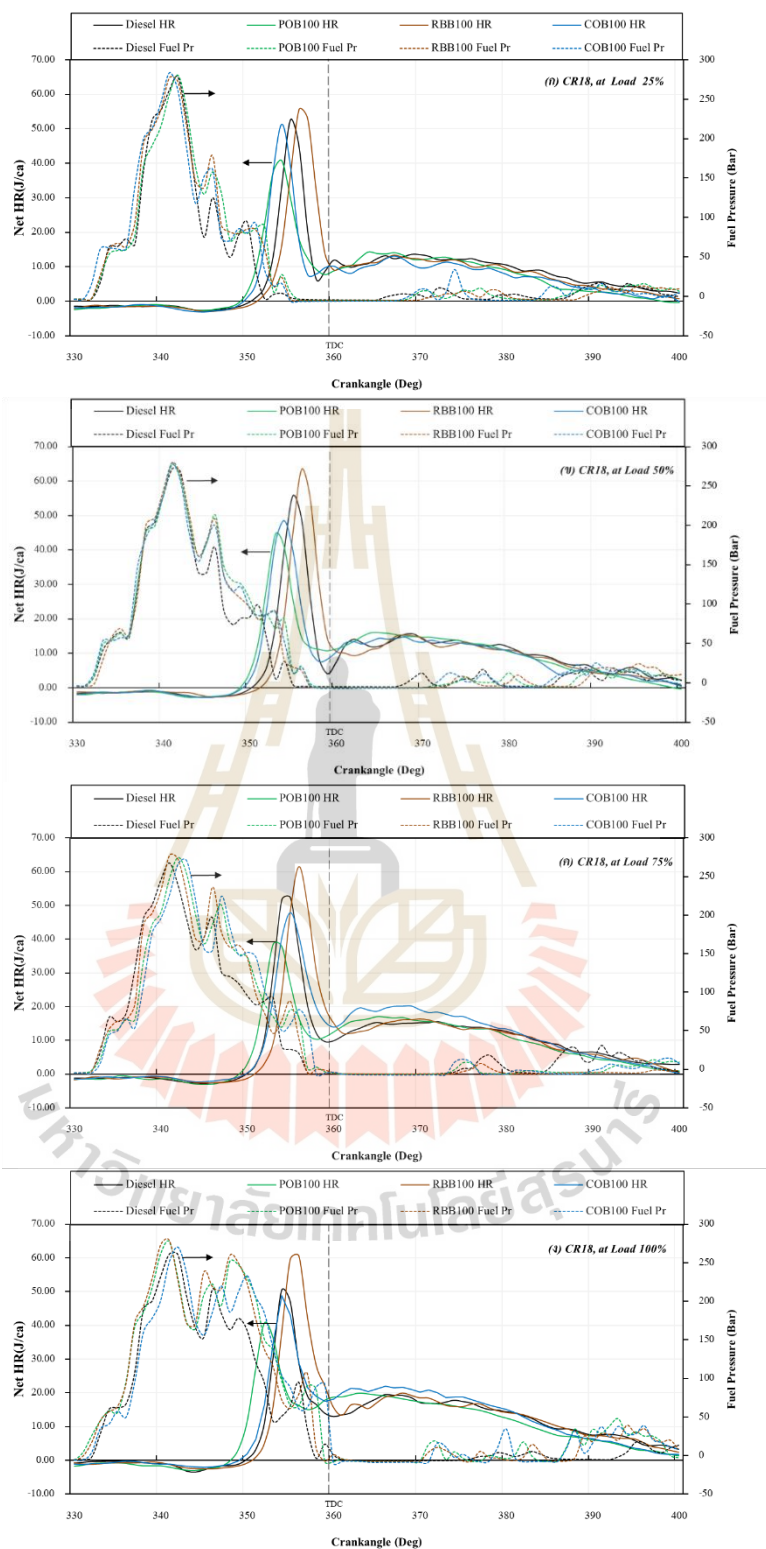
เริ่มใกล้เคียงกับดีเซลที่ 362 องศาเซลเซียสสำหรับโหลด 75% และเริ่มใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ 361 องศาเซลเซียสสำหรับโหลด 100% เนื่องมาจากความล่าช้าในการจุดระเบิดของไบโอดีเซลร่าข้าว (RBB100) ที่มากกว่าจึงทำให้เกิดการเผาไหม้พร้อมกันอย่างรุนแรงและทำให้เหลืออัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงการเผาไหม้นี้ต่ำกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่นและใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, 390 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป) เป็นช่วงที่การปลดปล่อยความร้อนเกิดขึ้นต่อไปที่อัตราต่ำในจังหวะขยายตัว ซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เล็กน้อย และเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น CO, HC ฯลฯ) จากผลการทดลองพบว่า เชื้อเพลิงที่มีช่วงการเผาไหม้นี้มีค่าเรียงจากมากไปน้อย คือ Diesel, RBB100, POB100 และ COB100 ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีการเผาไหม้สูงกว่าในช่วงนี้อาจจะมีแนวโน้มให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษ CO, HC มีความสัมพันธ์ตามลำดับนี้ด้วย

สรุปผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของไบโอดีเซล B100 เทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่าเชื้อเพลิง POB100 และ COB100 มีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าสั้นกว่าน้ำมันดีเซล ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าต่ำกว่าดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล การเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิง RBB100 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ยาวนานกว่า ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) มีใกล้เคียงน้ำมันดีเซล การเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) มีค่าใกล้เคียงน้ำมันดีเซล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่แย่กว่าน้ำมันดีเซล



รูปที่ 4.12 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ที่อัตราส่วนการอัด 18 ที่โหลดต่าง ๆ

#### 4.4.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของดีเซลผสม B40 เทียบกับดีเซล

การปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซลจากพืช 3 ชนิด จากปาล์ม ำข้าว และมะพร้าวในอัตราส่วนผสม 40%Vol หรือ B40 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล จากรูปที่ 4.15 แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมัน ดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม(B40) ได้แก่ POB40, RBB40 และ COB40 ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 พบว่า น้ำมัน POB40 มีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) สั้นกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งพบว่ามีค่าสั้นกว่า 1.80%, 6.55% และ 4.50% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ และสำหรับน้ำมัน RBB40 นั้นมี ช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่สั้นกว่าน้ำมันดีเซล 0.68%, 3.19% และ 4.01% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ และสำหรับน้ำมัน COB40 นั้นมี ช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่สั้นกว่าดีเซล 6.03%, 11.10% และ 6.85% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 และโดยรวมทั้ง 3 อัตราส่วนการอัดเชื้อเพลิง B40 มีค่าช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นกว่า เชื้อเพลิงดีเซล เฉลี่ย 4.29% , 2.63% และ 8.00% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิง COB40 มีค่าความล่าช้าที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากผล ของความหนืดที่ลดต่ำลงและองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) มีส่วนประกอบของกรดไขมัน (FAME) ประเภท Lauric acid (C12:0) 47.52%, Myristic acid (C14:0) 18.37% Caprylic acid (C8:0) 7.60% และ Capric acid (C10:0) 6.14% ซึ่งมีกรดไขมันเหล่านี้ ที่มีโซ่คาร์บอนที่สั้นกว่าไบโอดีเซล POB100 และ RBB100 และกรดไขมัน Caprylic acid (C8:0) 7.60% มีค่า Enthalpy of vaporization 79.8 (kJ/mol) (Verevkin, 2000) และ Capric acid (C10:0) 6.14% มีค่า Enthalpy of vaporization 76.4 (kJ/mol) (Stephenson and Malanowski, 1987) ทำให้มี ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งทำให้ส่วนอื่นได้รับความร้อน เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเชื้อเพลิงดีเซลผสม COB40 จึงมีค่าความล่าช้าในการจุด ระเบิดสั้นกว่าดีเซลมากที่สุด

เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้วหรือช่วงการเผาไหม้อย่าง รวดเร็ว (Premixed combustion phase หรือ Rapid combustion phase) จากผลการทดสอบพบว่า น้ำมันทั้ง 4 ชนิด มีค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สูงที่สุดใกล้เคียงกันที่โหลด 75% และ 100% แต่สำหรับที่โหลด 25% และ 50% อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของดีเซลจะสูงกว่าเชื้อเพลิง ดีเซลผสม B40 ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งแสดงถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิงไปในสัดส่วนที่มากกว่าเชื้อเพลิงชนิด อื่น ๆ เนื่องจากใน โหลด 25% และ 50% องศาการฉีดเชื้อเพลิงของดีเซลนั้นมีองศาการฉีดที่เร็ว กว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ก่อนเชื้อเพลิงชนิดอื่นทำให้ที่องศาเพล่าข้อเหวี่ยง

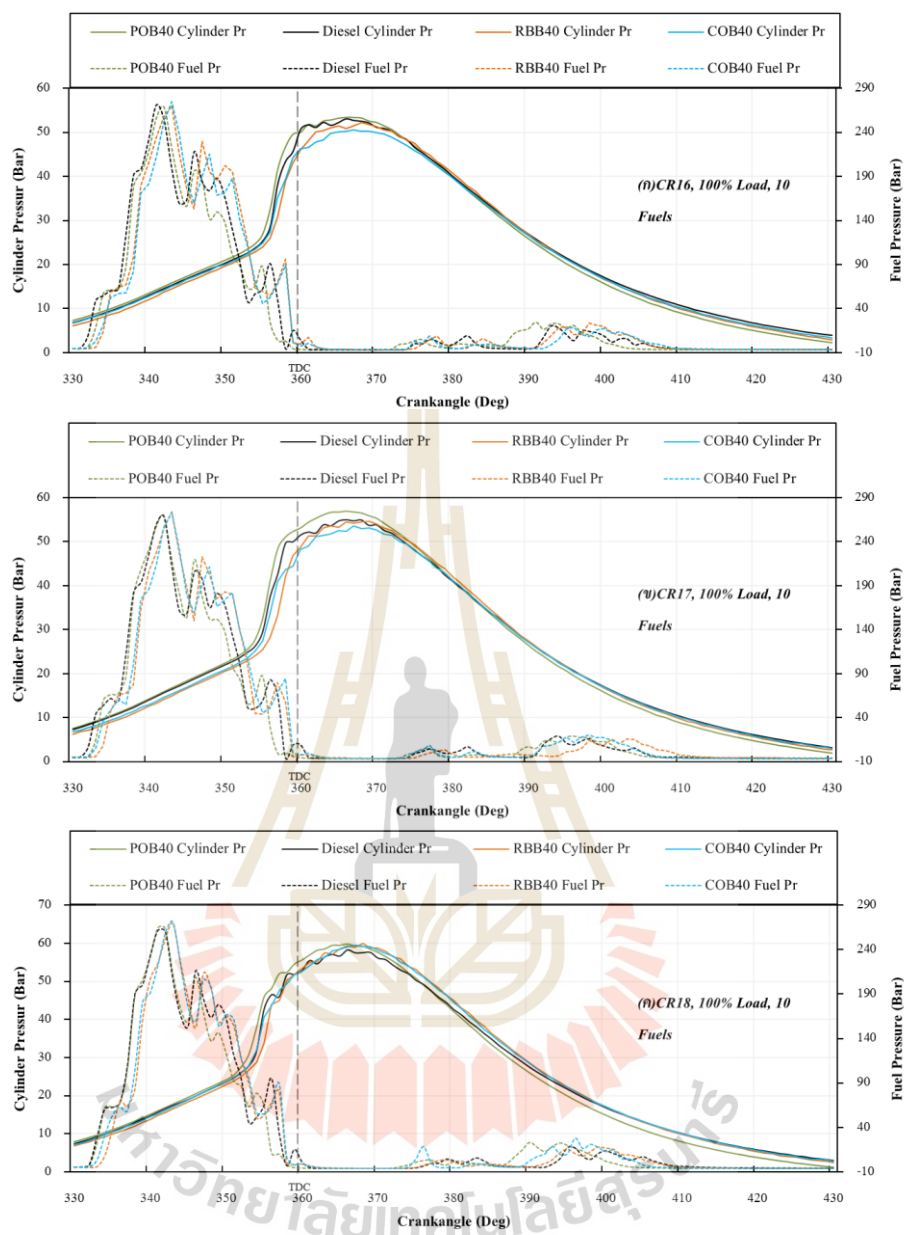
เดียวกันกันเชื้อเพลิงดีเซลมีการเผาไหม้ไปในสัดส่วนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ จึงจะทำให้โหลดที่ 25% และ 50% เชื้อเพลิงดีเซลอาจจะมีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) พบว่า เชื้อเพลิงดีเซลที่โหลด 25% และ 50% จะมีพฤติกรรมการปลดปล่อยความร้อนในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้นี้ต่ำ ลงอย่างมากเนื่องเชื้อเพลิงได้ถูกเผาไหม้ไปในช่วงการเผาไหม้สารผสมไปในสัดส่วนที่มากแล้วทำให้ช่วงต้นมีค่าต่ำลง และดีเซลยังมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงนี้ไม่ราบเรียบนัก เนื่องจากเชื้อเพลิงได้ถูกเผาไหม้ไปในช่วงการเผาไหม้ก่อนหน้ามากแล้ว และพบว่าเชื้อเพลิงดีเซลผสม B40 ทั้ง 3 ชนิด มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ต่อเนื่องกว่าน้ำมันดีเซลและใกล้เคียงกัน เนื่องมาจาก B40 มีออกซิเจนส่วนเกินที่มีในองค์ประกอบเชื้อเพลิงจึงทำให้เกิดเผาไหม้อย่างต่อเนื่องมากขึ้น

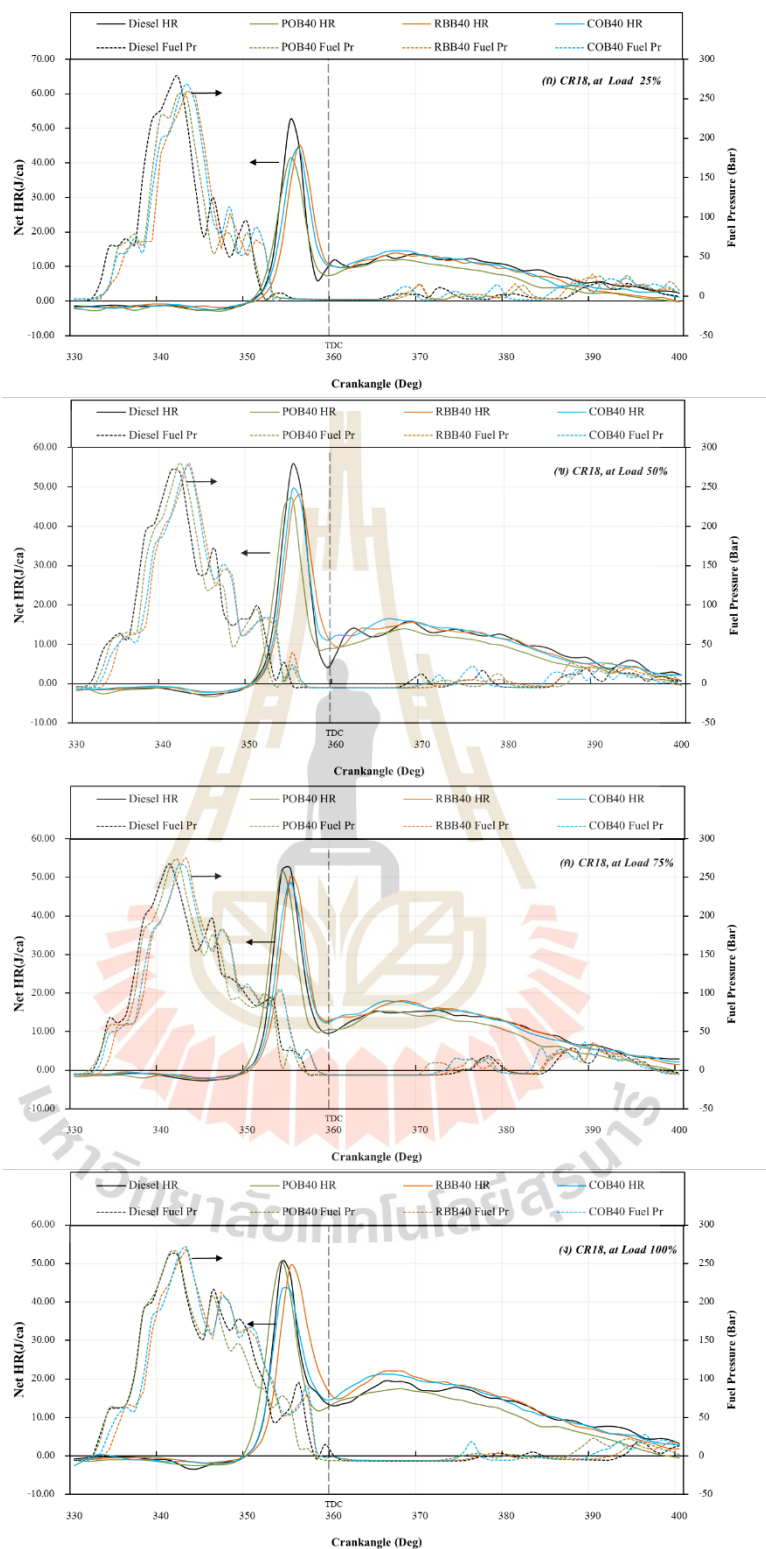
เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, 390 องศาเซลเซียสหรือเป็นต้นไป) เป็นช่วงที่การปลดปล่อยความร้อนเกิดขึ้นต่อไปที่อัตราต่ำในจังหวะขยายตัว ซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เล็กน้อย และเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น CO, HC ฯลฯ) จากผลการทดลองพบว่า เชื้อเพลิงดีเซลมีค่าความร้อนในช่วงนี้สูงกว่าน้ำมันดีเซลผสม B40 จากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด และในกลุ่มเชื้อเพลิงดีเซลผสม B40 ทั้ง 3 ชนิด มีการเผาไหม้ในช่วงนี้ใกล้เคียงกัน

สรุปผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของไบโอดีเซล B40 เทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่าเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 มีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าสั้นกว่าดีเซล ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าต่ำกว่าดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) RBB40 และ COB40 มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่มีเพียง POB40 ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลในช่วงนี้ และการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) POB40, RBB40 และ COB40 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล





รูปที่ 4.14 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล (B40) ที่อัตราส่วนการอัดต่างๆ



รูปที่ 4.15 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างดีเซลและดีเซลผสม (B40) ที่อัตราส่วนการอัด 18 ในโหลดต่าง ๆ

#### 4.4.5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของดีเซลผสม B20 เทียบกับดีเซล

การปลดปล่อยความร้อนของน้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซลจากพืช 3 ชนิด จากปาล์ม ไร่ข้าว และมะพร้าวในอัตราส่วนผสม 20 %Vol หรือ B20 เปรียบเทียบกับดีเซล จากรูปที่ 4.17 แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่าง น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B20) ได้แก่ POB20, RBB20 และ COB20 ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 พบว่า น้ำมัน POB20 มีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) สั้นกว่าดีเซล ซึ่งพบว่ามีค่าสั้นกว่า 5.77% และ 4.66% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 17 และ 18 ตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วนการอัด 16 POB20 มีความล่าช้าในการจุดระเบิดยาวนานกว่าน้ำมันดีเซล 1.95% และสำหรับน้ำมัน RBB20 นั้นมี ช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่สั้นกว่า น้ำมันดีเซล 2.85% และ 5.61% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 17 และ 18 ตามลำดับ แต่สำหรับอัตราส่วนการอัด 16 RBB20 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดยาวนานกว่าเล็กน้อย 0.64% และสำหรับน้ำมัน COB20 นั้นมีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่สั้นกว่าดีเซล 6.50% และ 7.78% โดยเฉลี่ยทุกโหลดที่อัตราส่วนการอัด 17 และ 18 ตามลำดับ แต่สำหรับ อัตราส่วนการอัด 16 COB20 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดยาวนานกว่า 3.15% และโดยรวมทั้ง 3 อัตราส่วนการอัด เชื้อเพลิง B20 มีค่าช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นกว่าเชื้อเพลิงดีเซล เฉลี่ย 2.83% , 2.61% และ 3.71% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง COB20 มีค่าความล่าช้าที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล อาจเนื่องมาจากผลของความหนืดที่ลดต่ำลงและองค์ประกอบทางเคมีในน้ำไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) มีส่วนประกอบของกรดไขมัน (FAME) ประเภท Lauric acid (C12:0) 47.52%, Myristic acid (C14:0) 18.37% Caprylic acid (C8:0) 7.60% และ Capric acid (C10:0) 6.14% ซึ่งมีกรดไขมันเหล่านี้ที่มีโซ่คาร์บอน ที่สั้นกว่าไบโอดีเซล POB100 และ RBB100 และกรดไขมัน Caprylic acid(C8:0) 7.60% มีค่า Enthalpy of vaporization 79.8 (kJ/mol) (Verevkin, 2000) และ Capric acid(C10:0) 6.14% มีค่า Enthalpy of vaporization 76.4 (kJ/mol) (Stephenson and Malanowski, 1987) ทำให้มีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นกว่าทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ง่ายซึ่งทำให้ส่วนอื่นได้รับความร้อนเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเชื้อเพลิงดีเซลผสม COB20 จึงมีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นกว่าดีเซล มากที่สุดและมีแนวโน้มเดียวกับ B40 และ B100

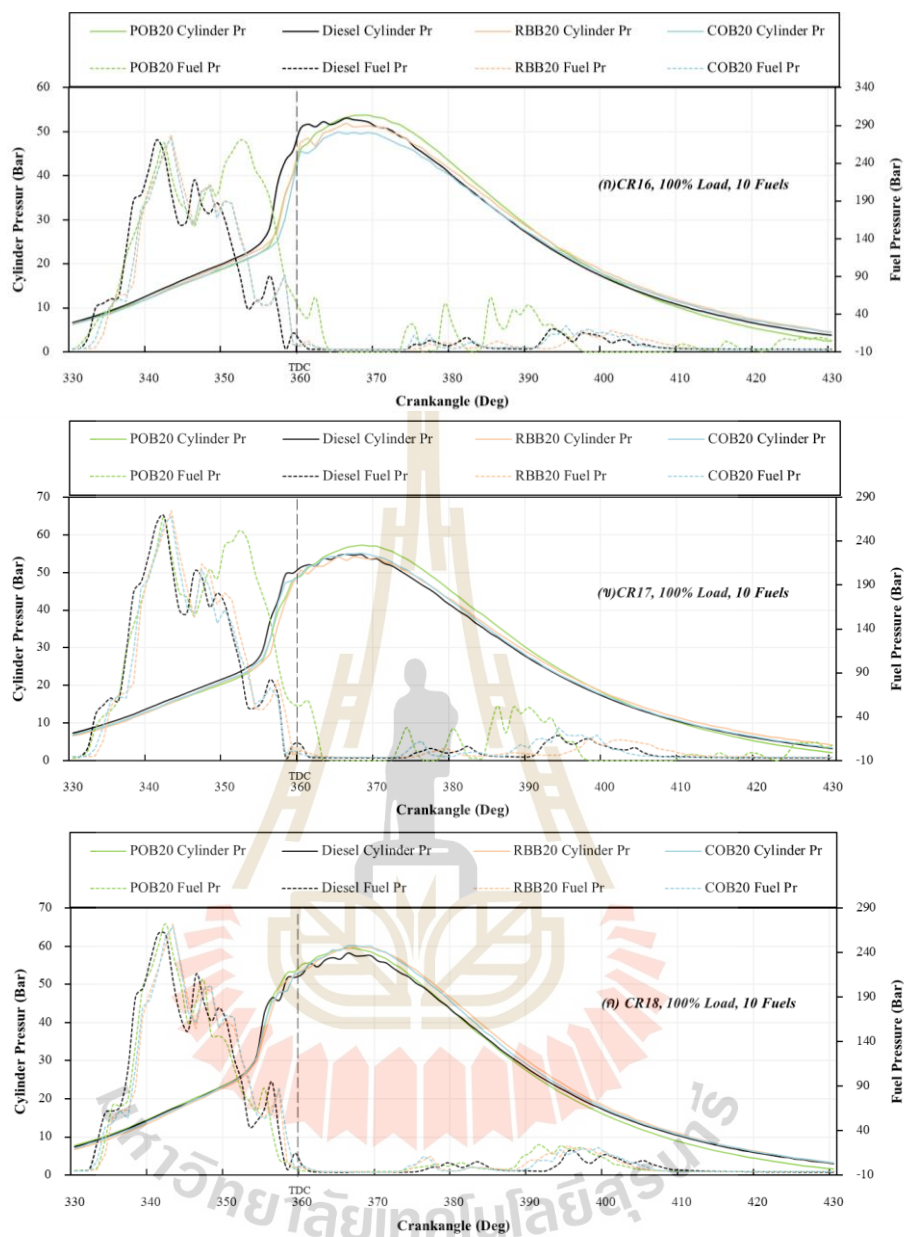
เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้วหรือช่วงการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (Premixed combustion phase หรือ Rapid combustion phase) จากผลการทดสอบพบว่า น้ำมันทั้ง 4 ชนิด มีค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สูงที่สุด ใกล้เคียงกัน ใน โหลด 75% และ 100% แต่สำหรับโหลดที่ 25% อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของดีเซลจะแตกต่างจากเชื้อเพลิง

ดีเซลผสม B20 ซึ่งแสดงถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิงไปในอัตราส่วนที่มากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ในช่วงการเผาไหม้

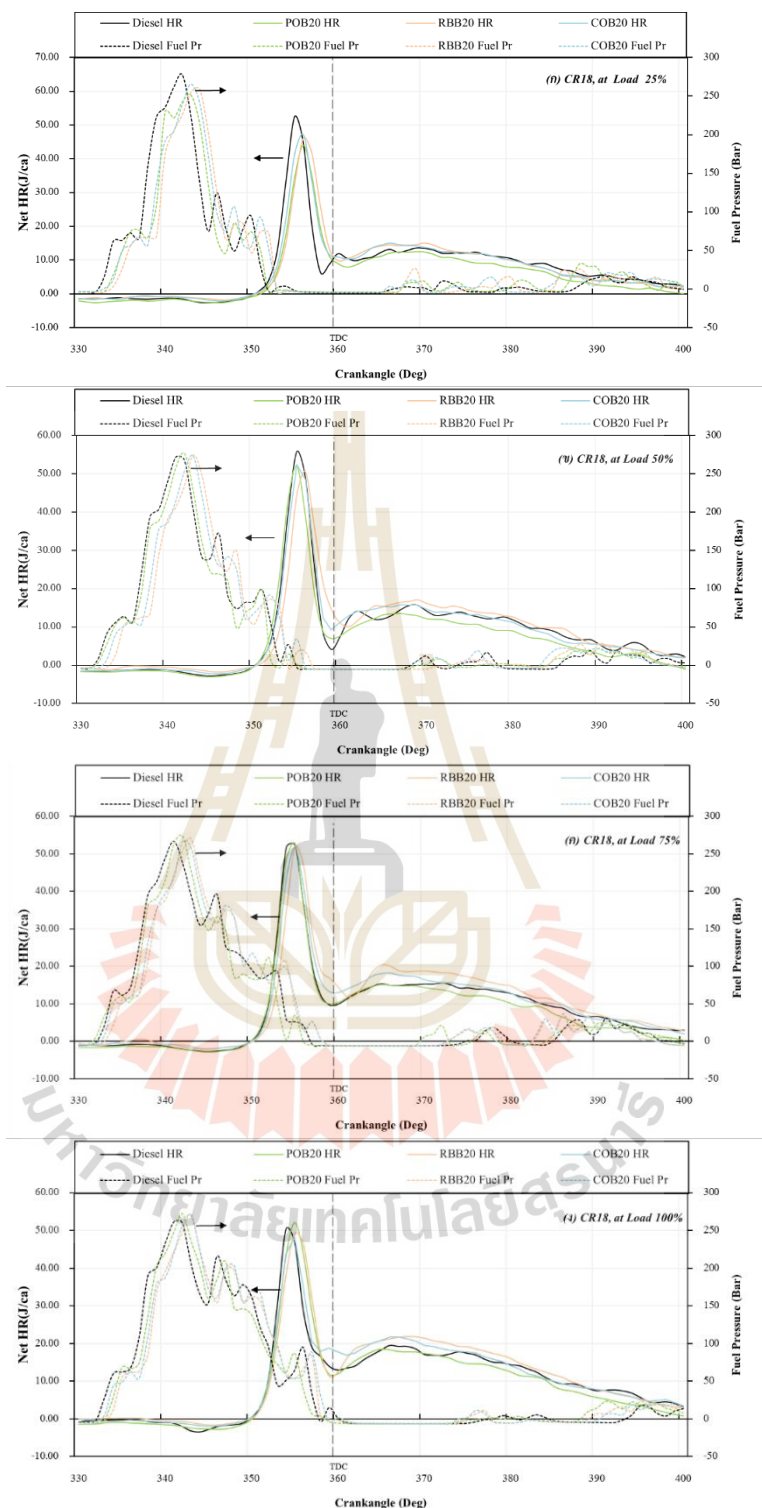
เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) พบว่า เชื้อเพลิงดีเซลที่ทุกโหลดจะมีพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้นี้ต่ำลงอย่างมากเนื่องจากเชื้อเพลิงได้ถูกเผาไหม้ไปในช่วงการเผาไหม้สารผสมไปในสัดส่วนที่มากแล้วทำให้ช่วงต้นมีค่าต่ำและน้ำมันดีเซลยังมีอัตราการปล่อยความร้อนในช่วงนี้ไม่ราบเรียบนัก และพบว่าเชื้อเพลิงดีเซลผสมจากปาล์ม POB20 มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ส่วนการเผาไหม้ช่วงนี้ของเชื้อเพลิงดีเซลผสม RBB20 และ COB20 มีการปล่อยความร้อนในช่วงนี้สูงกว่าน้ำมันดีเซล

เมื่อพิจารณาช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, 390 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป) เป็นช่วงที่การปล่อยความร้อนเกิดขึ้นต่อไปที่อัตราต่ำในจังหวะขยายตัว ซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เล็กน้อย และเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น CO, H<sub>2</sub> ฯลฯ) จากผลการทดลองพบว่าเชื้อเพลิงดีเซลมีการเผาไหม้ในช่วงนี้สูงกว่า B20 ทั้ง 3 ชนิด เล็กน้อย และจะเพิ่มสูงขึ้นตามโหลดของเครื่องยนต์

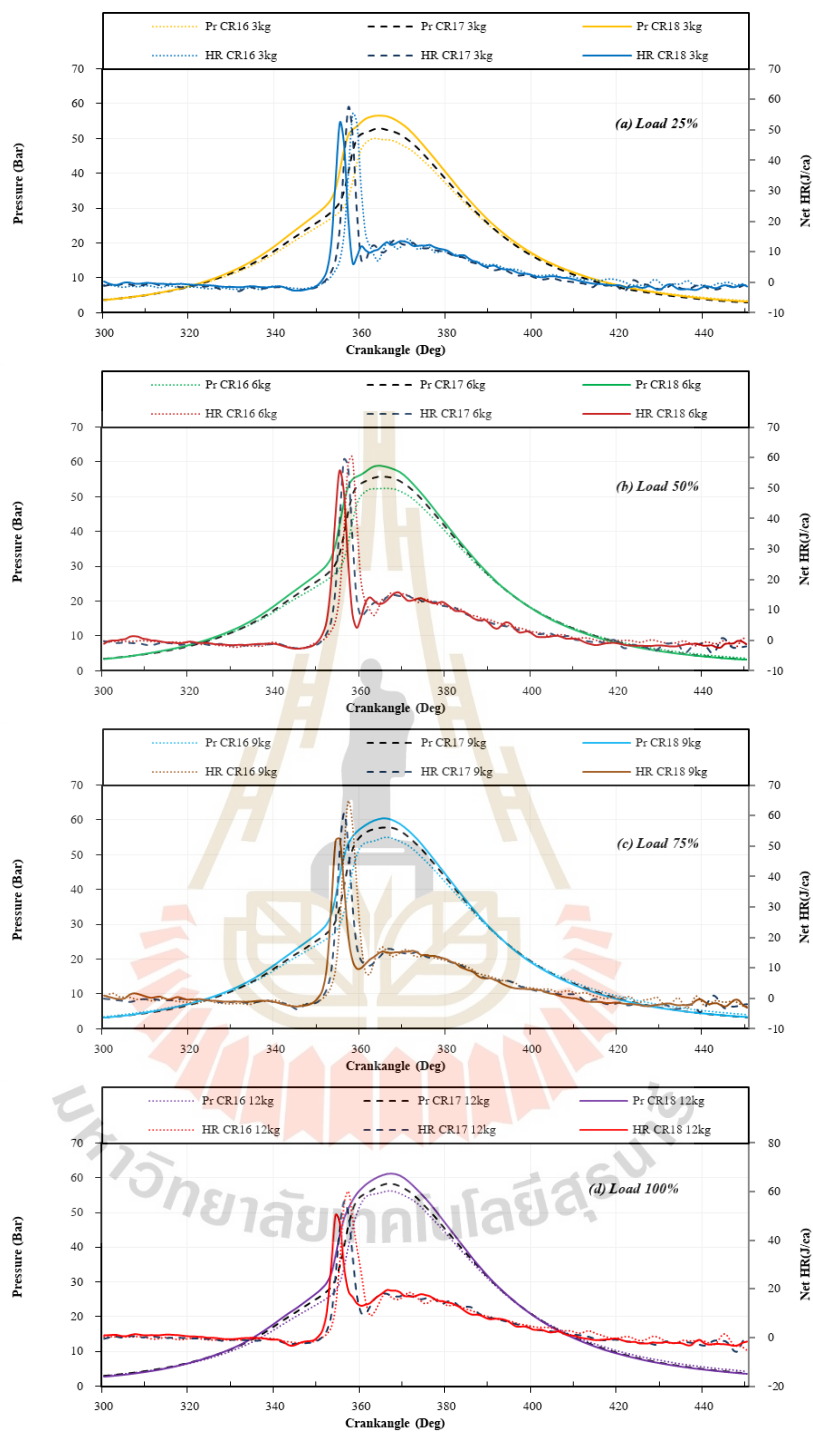
สรุปผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของไบโอดีเซล B20 เทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่าเชื้อเพลิง POB20 RBB20 และ COB20 มีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าสั้นกว่าน้ำมันดีเซล และในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) RBB20 และ COB20 มีค่าสูงกว่าดีเซล แต่ POB20 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) POB20 RBB20 และ COB20 มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่ดีกว่า



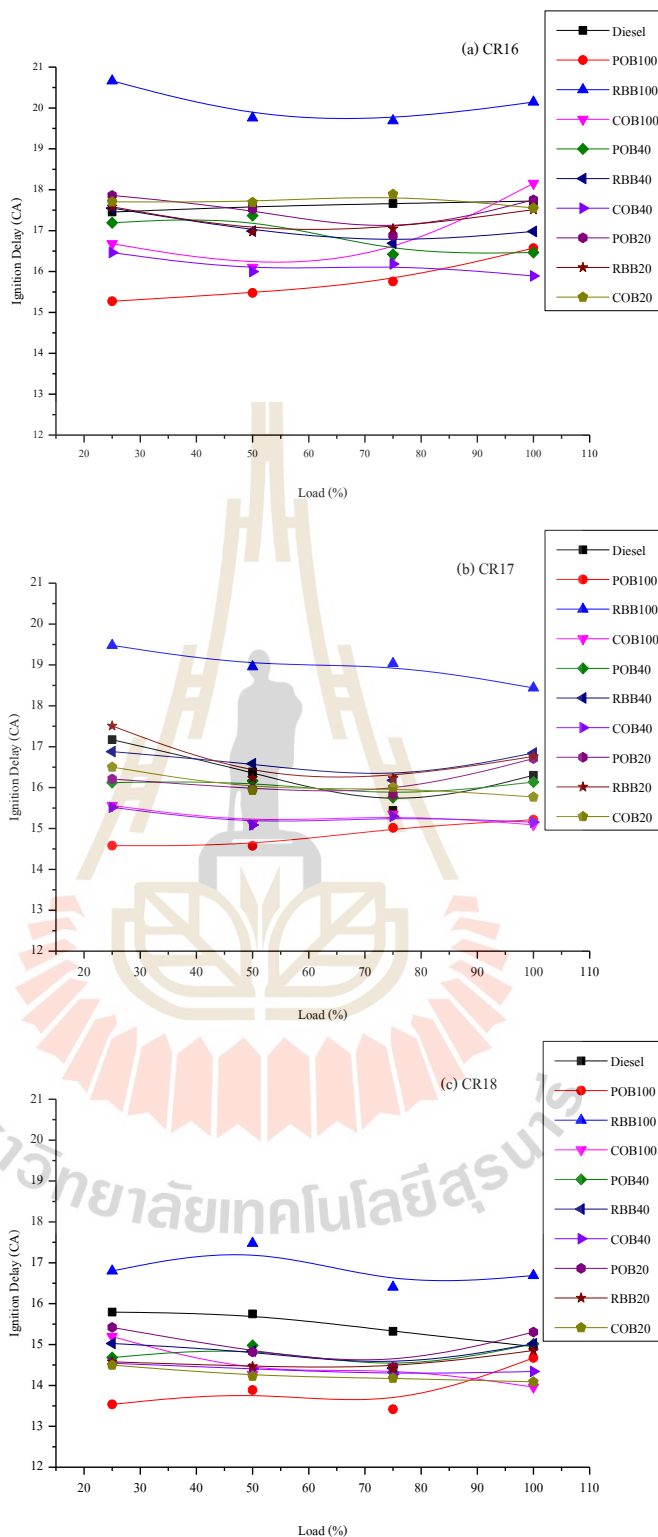
รูปที่ 4.16 ความดันในกระบอกสูบและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลผสม (B20) ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



รูปที่ 4.17 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันดีเซลผสม (B20) ของอัตราส่วนการอัด 18 ที่โหลดต่าง ๆ

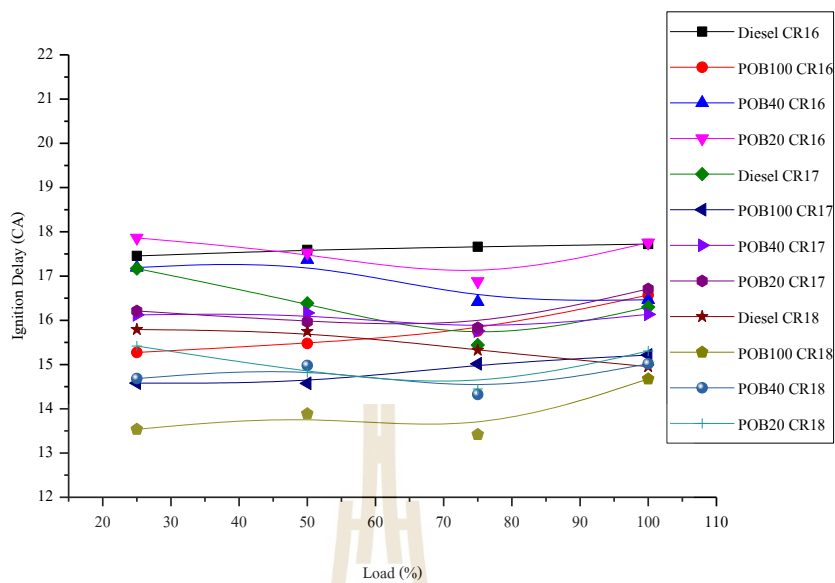


รูปที่ 4.18 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนในแต่ละองศาเพลลาข้อเหวี่ยงของเชื้อเพลิงดีเซลเปรียบเทียบอัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ในโหลดต่าง ๆ

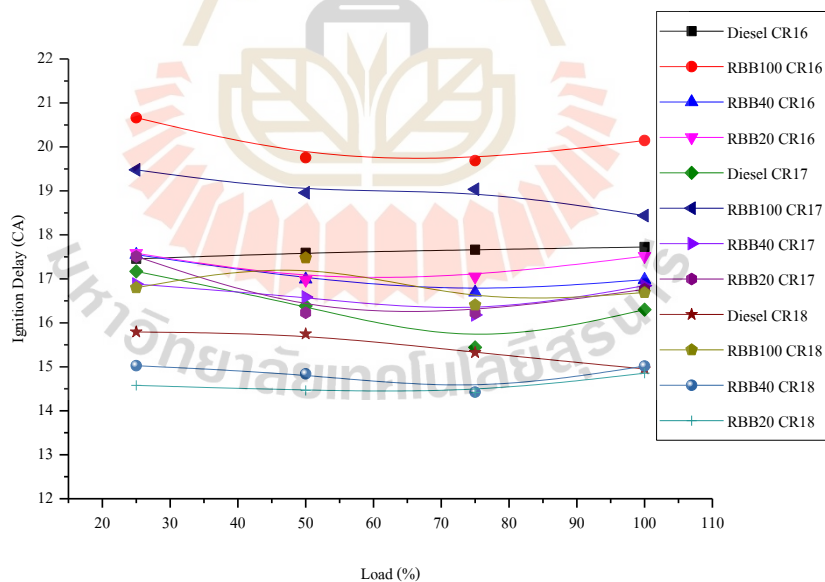


รูปที่ 4.19 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับ โหลดของเชื้อเพลิงทั้ง 10 ชนิด ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ

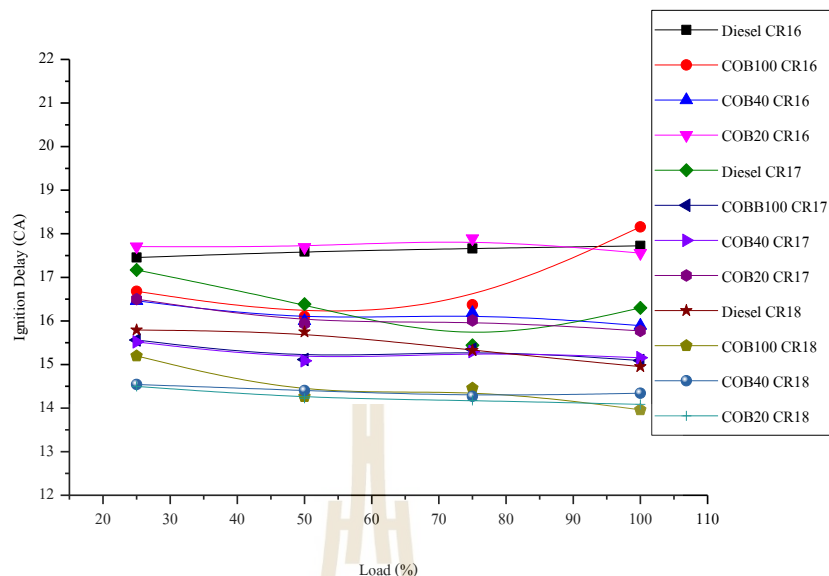




รูปที่ 4.20 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



รูปที่ 4.21 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



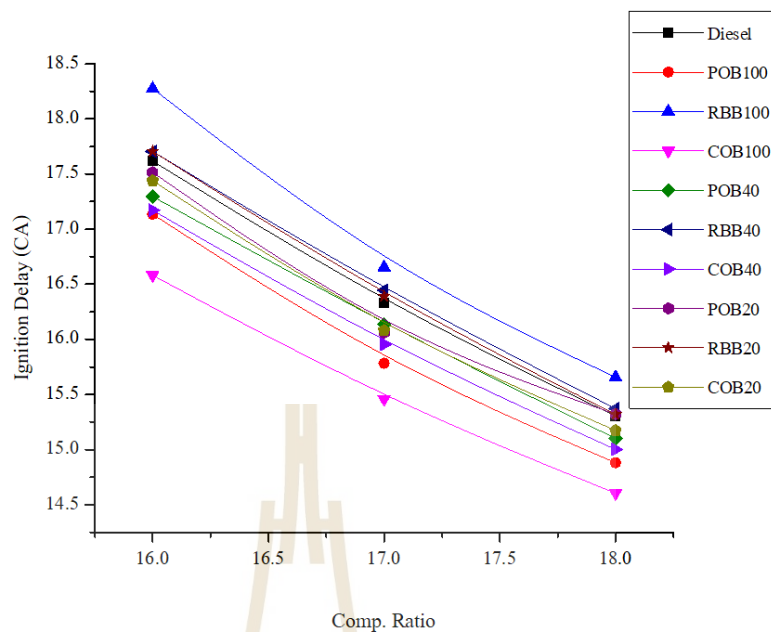
รูปที่ 4.22 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ

#### 4.4.6 สหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิด

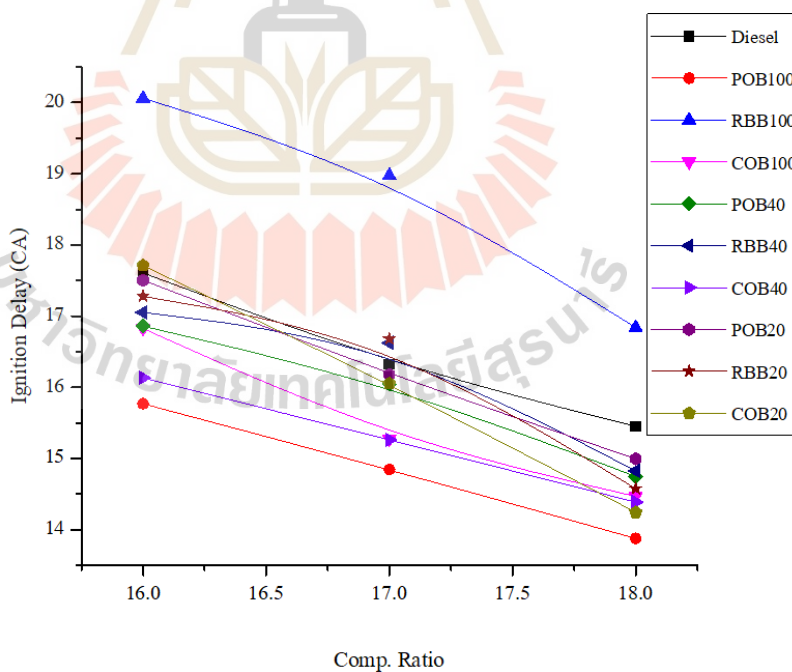
ความล่าช้าในการจุดระเบิดส่งผลต่อการให้สมรรถและการปล่อยมลพิษไอเสียโดยตรง ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นศึกษาการทำนายความล่าช้าในการจุดระเบิด โดยใช้ สหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิดของ ฮาร์เดนเบิร์กและเฮส (Hardenberg and Haze) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 และนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

จากการคำนวณเราได้นำความเร็วรอบเครื่องยนต์ ค่าดัชนีซีเทน อัตราส่วนการอัด และอุณหภูมิไอศึ มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งพบว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าดัชนีซีเทนที่สูงจะมีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นกว่า ซึ่งในที่นี้ คือ กลุ่มของเชื้อเพลิง COB100 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดต่ำที่สุด และ RBB100 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดยาวนานที่สุด

จากผลการทดสอบเราได้วัดความล่าช้าในการจุดระเบิด โดยดูช่วงองศาที่เริ่มฉีดเชื้อเพลิงจนเริ่มการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งความดันเชื้อเพลิงที่สามารถฉีดได้ในช่วงจังหวะอัดตัวโดยเชื้อเพลิงจะเริ่มฉีด ที่ความดัน 200 บาร์ และจุดสิ้นสุดความล่าช้าในการจุดระเบิดคือจังหวะที่เริ่มการเผาไหม้ โดยสามารถดูได้จาก อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงองศาเผาไหม้ข้อเหวี่ยงสูงสุดหรือดูที่อัตราการปลดปล่อยความร้อนได้เช่นเดียวกัน จากผลการทดลองพบว่าเชื้อเพลิง COB100 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นที่สุด และ RBB100 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดยาวนานที่สุด



รูปที่ 4.23 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับอัตราส่วนการอัดจากการคำนวณด้วยสมการสหสัมพันธ์



รูปที่ 4.24 ความล่าช้าในการจุดระเบิดกับอัตราส่วนการอัดที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์

เมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบการทดสอบและการทำนายความล่าช้าในการจุดระเบิด พบว่าเชื้อเพลิงหลาย ๆ ชนิดมีค่าความล่าช้าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน 0.22-2.14% หรือคลาดเคลื่อนไปเพียง 0.02-0.34 องศาเซลเซียส แต่สำหรับเชื้อเพลิง RBB100, POB100 และ COB40 ก่อนข้างมีความคลาดเคลื่อนสูง 9.40%, 7.40% และ 5.07% หรือ 1.77, 1.1 และ 0.78 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เฉลี่ยที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ซึ่งถือว่าการทำนายความล่าช้าในการจุดระเบิด มีความแม่นยำ โดยเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิง 96.95%



ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการทำนายความล่าช้าในการจุดระเบิด

ประเภทเชื้อเพลิง	ID(CA) Test@CR16	ID(CA) Test@CR17	ID(CA) Test@CR18	ID(CA) Cal.@CR16	ID(CA) Cal.@CR17	ID(CA) Cal.@CR18	ความคลาดเคลื่อน (%) ที่ CR16	ความคลาดเคลื่อน (%) ที่ CR17	ความคลาดเคลื่อน (%) ที่ CR18	เฉลี่ย
Diesel	17.61	16.32	15.45	17.62	16.33	15.30	-0.05	-0.03	0.96	0.29
POB100	15.77	14.85	13.88	17.14	15.78	14.88	-8.66	-6.31	-7.22	<b>-7.40</b>
RBB100	20.06	18.98	16.84	18.27	16.65	15.66	8.91	12.24	7.04	<b>9.40</b>
COB100	16.83	15.28	14.47	16.58	15.46	14.60	1.46	-1.17	-0.94	-0.22
POB40	16.86	16.05	14.75	17.30	16.14	15.10	-2.58	-0.56	-2.38	-1.84
RBB40	17.05	16.62	14.83	17.70	16.45	15.37	-3.82	1.07	-3.68	-2.14
COB40	16.13	15.26	14.39	17.17	15.95	15.00	-6.43	-4.52	-4.25	<b>-5.07</b>
POB20	17.51	16.18	15.00	17.52	16.06	15.32	-0.05	0.74	-2.16	-0.49
RBB20	17.28	16.68	14.58	17.70	16.39	15.32	-2.46	1.73	-5.08	-1.94
COB20	17.71	16.05	14.25	17.44	16.08	15.17	1.54	-0.17	-6.51	-1.71

หมายเหตุ + คือ เพิ่มขึ้น - คือ ลดลง, ID คือ ความล่าช้าในการจุดระเบิด

Test คือ ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์, Cal. คือ ได้จากการคำนวณ

#### 4.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลสมรรถนะเครื่องยนต์

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากพืช 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม รำข้าว และมะพร้าว และไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนผสม 20% และ 40% Vol. เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบคือ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) โดยสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

##### 4.5.1 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC)

ผลการเปรียบเทียบ โหลดต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) จากรูปที่ 4.23 แสดงความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับโหลด ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) เป็นความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยมวลต่อกำลังหนึ่งหน่วยที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ จากผลการทดลองพบว่า BSFC มีแนวโน้มลดลงสัมพันธ์ตามการเพิ่มขึ้นของโหลด โดยเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนการอัด 16 มีค่า BSFC (kg/kWh) เท่ากับ 0.827, 0.541, 0.456 และ 0.454 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัด 17 มีค่า BSFC(kg/kWh) เท่ากับ 0.796, 0.525, 0.439 และ 0.424 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ และสำหรับอัตราส่วนการอัด 18 ที่เป็นอัตราส่วนการอัดสูงสุด มีค่า BSFC (kg/kWh) เท่ากับ 0.793, 0.518, 0.431 และ 0.403 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าการเพิ่มโหลดให้กับเครื่องยนต์ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกจะมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากในช่วงโหลดต่ำนั้นมีการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่น้อยส่งผลให้เกิดความร้อนต่ำ และความต่อเนื่องของการเผาไหม้ไม่ดีนักทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพมากนัก เมื่อเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปยังห้องเผาไหม้ และเมื่อเทียบโหลดที่สูงขึ้นเชื้อเพลิงมีปริมาณที่สูงความร้อนในการเผาไหม้ก็จะสูงขึ้นความต่อเนื่องในการเผาไหม้ดีขึ้น (สังเกตได้จาก รูปที่ 4.10 ดังกราฟการปลดปล่อยความร้อนมีความราบเรียบเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มโหลด) หรืออธิบายอีกในด้านของปริมาณการฉีดที่มีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดสัมพันธ์กับภาระที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นตรงในเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากเมื่อภาระเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของแก๊สที่ค้างอยู่และอุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิของอากาศ (สารผสมระหว่างอากาศกับแก๊สที่ค้างอยู่) สูงขึ้น (และความดันของสารผสมสูงขึ้นเล็กน้อยด้วย) ที่จังหวะการฉีดจึงทำให้ความล่าช้าลดลง (John B. Heywood, 1998) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังเบรกที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยมวล (Devaraj et al., 2015) และเป็นผลให้ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ลดลง

ผลของการปรับอัตราส่วนการอัดต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) จากรูปที่ 4.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ต่อผลในการใช้อัตราส่วนการอัด 16, 17, 18 ที่โหลดสูงสุดโดยสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทดสอบที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 เทียบกับอัตราส่วนการอัด 16 พบว่า ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกลดลงในน้ำมันทุกประเภทที่โหลดสูงสุดเฉลี่ย 10.19% ซึ่งพบการเปลี่ยนที่ลดลงมากสุดในกลุ่มน้ำมันไบโอดีเซล (B100) และสูงสุดในน้ำมันไบโอดีเซลรำข้าว (RBB100) เท่ากับ 25.67% อาจเนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลรำข้าว ที่อัตราส่วนการอัด 16 มีค่า ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่สูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ เป็นพิเศษเนื่องจากความหนืดที่สูงและมีโครงสร้างของกรดไขมันที่มีโครงสร้างแข็งแรงอยู่เป็นจำนวนมากกว่าน้ำมันชนิดอื่น เช่น Oleic acid (C18:1n9c) 40.25% และ Linoleic acid (C18:2n6c) 33.26% ดังตารางที่ 4.4 และมีค่าเอนทัลปีของการระเหยตัว (Enthalpy of vaporization) ที่สูงกว่าเชื้อเพลิงอื่น ๆ จึงทำให้การเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอากาศและความร้อนช่วยให้เกิดการปรับปรุงการเผาไหม้ที่ดีและเกิดการเปลี่ยนแปลง และสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลมีการเปลี่ยนแปลงลดลงน้อยที่สุด 2.32% เนื่องจากเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าความร้อนที่สูงและความหนืดที่ต่ำกว่าอยู่แล้ว จึงทำให้เชื้อเพลิงดีเซลอาศัยความร้อนในการเริ่มการเผาไหม้น้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ความร้อนและความดันที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการอัด จึงมีผลการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มไบโอดีเซล (B100) ที่มีโมเลกุลที่หนัก และค่าความร้อนต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของน้ำมันไบโอดีเซล (B100) กับน้ำมันดีเซล พบว่า B100 ทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่สูงกว่าดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 7.47%, 25.04% และ 31.20% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ มีค่าที่สูงกว่าดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 3.52%, 19.63% และ 22.70% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BSFC ใกล้เคียงกับดีเซลมากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 6.99% และ 9.79% สำหรับเชื้อเพลิง RBB100 และ COB100 ตามลำดับ แต่สำหรับ POB100 ที่อัตราส่วนการอัด 18 มีค่า BSFC ต่ำกว่าดีเซล 0.61% ซึ่งสังเกตได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยให้เชื้อเพลิง B100 มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและช่วยให้มีการลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของ B100 ให้ใกล้เคียงกับดีเซลมากยิ่งขึ้น น้ำมันเชื้อเพลิง POB100 มีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกน้อยที่สุดในกลุ่ม B100 ทั้ง 3 อัตราส่วนการอัด และ COB100 มีค่า BSFC สูงที่สุดในเชื้อเพลิงกลุ่ม B100 ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความร้อนเชื้อเพลิง COB100 ต่ำกว่า POB100 5.74% และโดยรวมน้ำมันไบโอดีเซล POB100, RBB100 และ COB100 มีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงกว่าน้ำมันดีเซลเฉลี่ยทุกโหลดและทุกอัตราส่วนการอัด 4.17%, 17.13%

และ 19.67% ตามลำดับ เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ด้อยกว่าน้ำมันดีเซล เช่น ค่าความร้อนเชื้อเพลิง และค่าความหนืดที่มีผลต่อขนาดของหยดระอองน้ำมัน และค่าดัชนีซีเทน น้อยกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการเผาไหม้และการบริโภคเชื้อเพลิงน้ำมันไบโอดีเซลจึงสูงกว่าดีเซล ดังในรูปที่ 4.13 แสดงความดันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่สูงกว่าทำให้มีการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่าดีเซลจึงมีอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงที่สูงกว่าดีเซล เพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานความร้อนที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับกาเผาไหม้น้ำมันดีเซล

เมื่อเปรียบเทียบ BSFC ของ B40 กับเชื้อเพลิงดีเซล พบว่า B40 ทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่สูงกว่าดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ -7.15%, 3.05% และ 0.83% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ และมีค่าที่สูงกว่าดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ -8.09%, 0.56% และ 2.18% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BSFC ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 10.94%, 4.94% และ 3.43% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยให้เชื้อเพลิง B40 มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและช่วยให้มีการลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของ B40 ให้ดีกว่าน้ำมันดีเซลมากยิ่งขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ BSFC ของ B20 กับเชื้อเพลิงดีเซล พบว่า B20 ทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่ต่ำกว่าดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 8.44%, 0.12% และ -2.56% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ มีค่า BSFC ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 14.44%, 5.11% และ 4.39% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BSFC ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 13.16%, 8.36% และ 4.47% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยให้เชื้อเพลิง B20 มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและช่วยให้มีการลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของ B20 ให้ดีกว่าน้ำมันดีเซลมากยิ่งขึ้น ซึ่งการลดลงของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคนี้ เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนในสารผสมของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลผสม B20 และ B40 ที่ถูกฉีดเข้าไป (John B. Heywood, 1998) ซึ่งออกซิเจนส่วนเกินในสารผสมนี้จะทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นช่วยลดการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงลงได้ และมีแนวโน้มเป็นไปตามความสัมพันธ์ความล่าช้าในการจุดระเบิดของดีเซลผสม B40 และ B20 ที่สั้นกว่าเชื้อเพลิงดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิง RBB40 ที่อัตราส่วนการอัด 16 และ 17 มีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคสูงกว่าดีเซล 2.07% และ 2.61% ตามลำดับ เนื่องจากค่าความหนืดที่สูงกว่าดีเซล 11% และมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าดีเซล 6.10% ซึ่งคุณสมบัติบางตัว เช่น ความหนืดที่สูงขึ้นนั้นจะเป็นผลให้การเผาไหม้ได้น้อยลงในอัตราส่วนการอัดที่ต่ำ ส่งผลให้



BSFC เพิ่มขึ้นนั่นเอง และสำหรับเชื้อเพลิง COB40 ที่อัตราส่วนการอัด 17 ก็มีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคสูงกว่าดีเซล 4.31% ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 8.16%

#### 4.5.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (BTE)

ผลการเปรียบเทียบโหลดต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (BTE) จากรูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคกับ โหลดที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค(BTE) เป็นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล และพบว่า BTE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของโหลด โดยเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนการอัด 16 มีค่า BTE (%) เท่ากับ 10.40, 15.75, 18.53 และ 18.35 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัด 17 มีค่า BTE (%) เท่ากับ 10.66, 15.99, 19.11 และ 19.94 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ และสำหรับอัตราส่วนการอัด 18 ที่เป็นอัตราส่วนการอัดสูงสุด มีค่า BTE (%) เท่ากับ 10.49, 16.16, 19.49 และ 20.90 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ โดยสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มโหลดให้กับเครื่องยนต์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (BTE) จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงโหลดที่ต่ำนั้นมีการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่น้อยส่งผลให้เกิดความร้อนและความต่อเนื่องของการเผาไหม้ที่ต่ำกว่าเมื่อในโหลดที่สูงขึ้นเชื้อเพลิงที่ใช้มีปริมาณที่มากขึ้นและส่งผลทำให้ความร้อนในการเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มีความต่อเนื่องในการเผาไหม้ดีขึ้น (สังเกตได้จากรูปที่ 4.10 ดังกราฟการปลดปล่อยความร้อนมีความราบเรียบเพิ่มขึ้นขึ้นตามการเพิ่มโหลด) และการเพิ่มโหลดที่มีผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลงมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นตรงในเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากเมื่อภาระเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของแก๊สที่ค้างอยู่และอุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิของอากาศ (สารผสมระหว่างอากาศกับแก๊สที่ค้างอยู่) สูงขึ้น (และความดันของสารผสมสูงขึ้นเล็กน้อยด้วย) ที่จังหวะการฉีดจึงทำให้ความล่าช้าลดลง (John B. Heywood, 1998) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังเบรคที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (Devaraj et al., 2015) เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคเพิ่มขึ้น

ผลของการปรับอัตราส่วนการอัดต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (BTE) จากตารางที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (BTE) ต่อผลในการใช้อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ที่โหลดสูงสุดโดยสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของน้ำมันทุกประเภทสูงขึ้นจากเดิมเท่ากับ 2.44%, 1.51%, 3.05%, 7.96% และ 4.07% ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% และเฉลี่ยทุกโหลดตามลำดับ และเมื่อทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค

ของน้ำมันทุกประเภทยังคงสูงขึ้นจากเดิมเท่ากับ 0.03%, 1.00%, 1.95%, 4.59% และ 2.24% ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% และเฉลี่ยทุกโหลด ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญและเกิดการเพิ่มขึ้นมากที่สุดในสภาวะโหลดสูงสุด เนื่องมาจากที่โหลดสูงสุดจะมีปริมาณเชื้อเพลิงอยู่เป็นจำนวนมากที่สูงการมีความร้อนและความเข้มข้นของอากาศที่มากขึ้นจากการเพิ่มอัตราส่วนการอัดจึงมีผลช่วยมากขึ้นสำหรับที่โหลดสูงสุด และการเพิ่มอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 จะพบการเพิ่มขึ้นของ BTE มากสุดในกลุ่มน้ำมัน B100 และสูงสุดในเชื้อเพลิง RBB100 เท่ากับ 33.62% แต่มีการเปลี่ยนน้อยที่สุดในน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล 2.32% อาจเนื่องมาจากน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลมีความสามารถในการเผาไหม้ได้ค่อนข้างง่ายกว่าไบโอดีเซลด้วยค่าความหนืดที่ต่ำกว่า และค่าความร้อนที่สูงกว่าไบโอดีเซล ความร้อนและความดันที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอัตราส่วนการอัดจึงมีผลการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มไบโอดีเซลที่มีโมเลกุลที่หนักและค่าความร้อนน้อยกว่า และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิง B100 และกลุ่มเชื้อเพลิง B40, B20 จากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด มีสูงกว่าน้ำมันดีเซล ในกลุ่มไบโอดีเซล (B100) จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเทียบกับดีเซลโดยเฉลี่ยทุกโหลดพบว่า มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลเท่ากับ -2.25%, 2.45%, 9.67% ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ กลุ่มดีเซลผสม (B40) สูงกว่าดีเซลเท่ากับ 8.31%, 9.39% และ 14.49% ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ และกลุ่มดีเซลผสม (B20) เมื่อเทียบกับดีเซลเปลี่ยนแปลงดังนี้ 6.00%, 12.74% และ 13.36% ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นมีผลกระทบและให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลผสมที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล

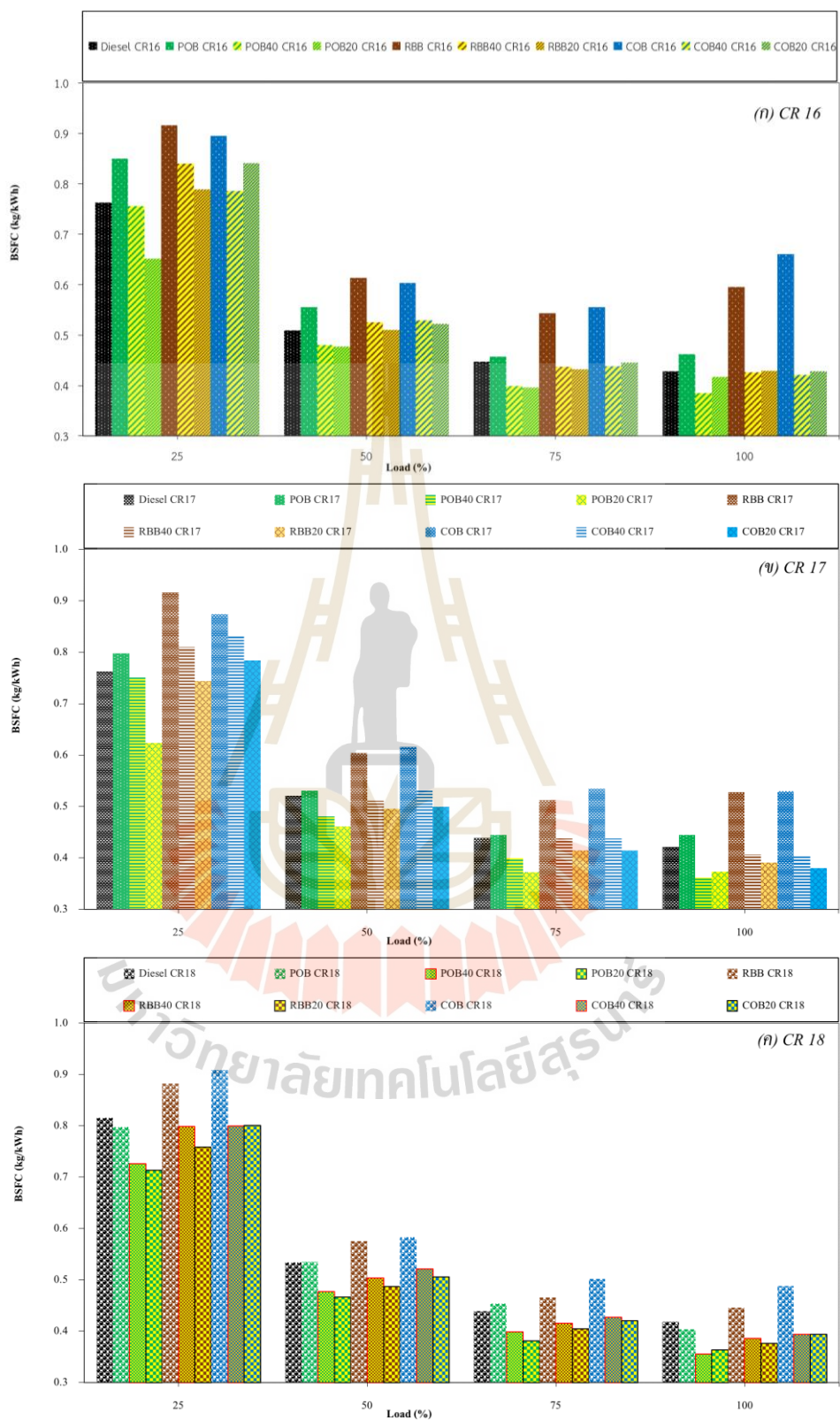
หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของน้ำมันไบโอดีเซล (B100) กับน้ำมันดีเซลพบว่า POB100 มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าดีเซล 10.95% และ COB100 มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าน้ำมันดีเซลเพียงเล็กน้อย 0.64% ซึ่งไม่ได้มีนัยสำคัญมากนัก แต่น้ำมันไบโอดีเซล RBB100 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรکت่ำกว่าน้ำมันดีเซลเฉลี่ยทุกโหลดและทุกอัตราส่วนการอัดประมาณ 1.72% ตามลำดับ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันไบโอดีเซลผสม B40 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ B40 สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 14.07%, 3.60% และ 7.26% สำหรับ POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 15.74%, 6.02% และ 6.40% สำหรับ POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัด 18 เท่ากับ 21.54%, 12.88% และ 12.44% สำหรับ POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นทำให้เชื้อเพลิง B40

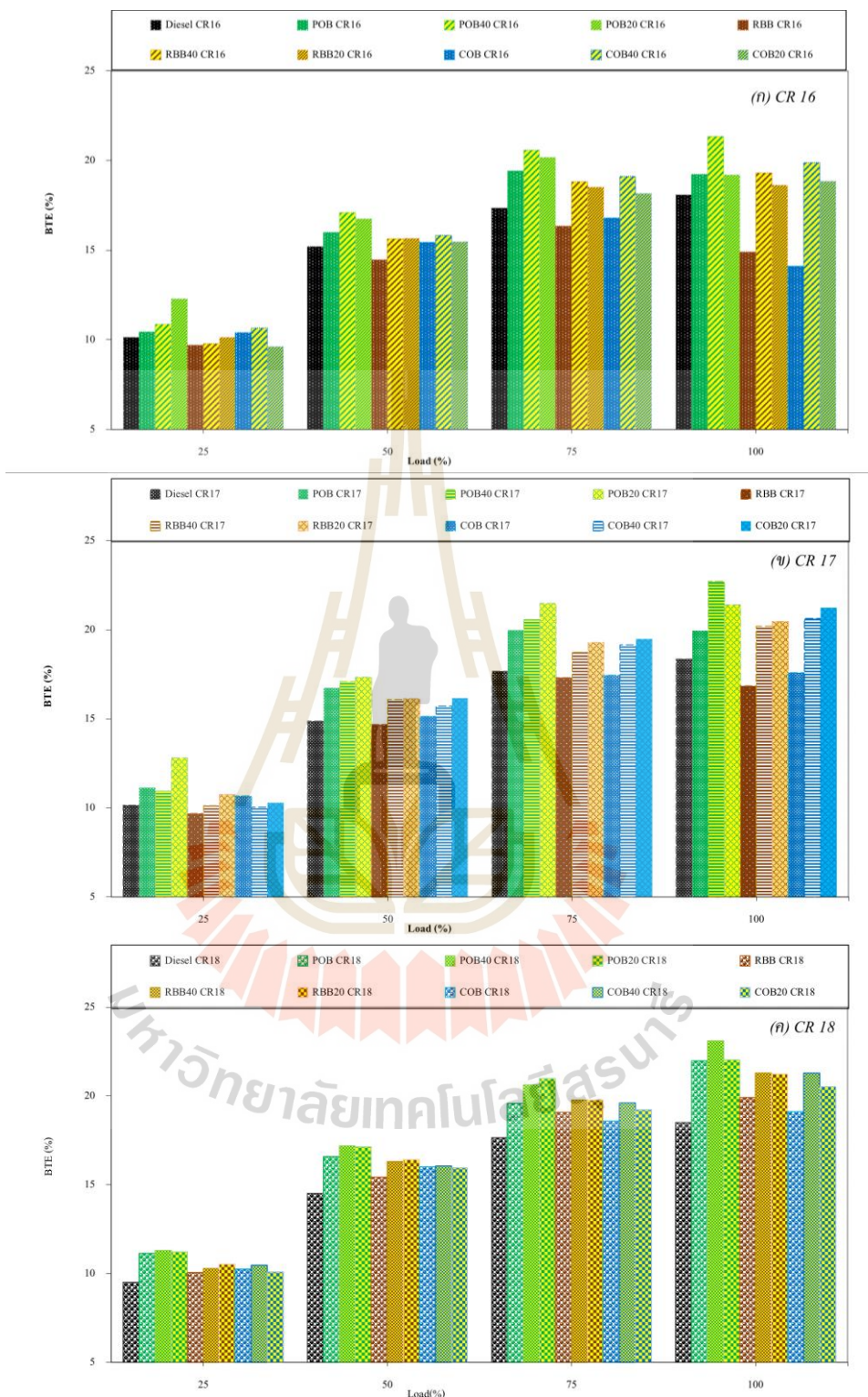
มีการปรับปรุงค่า BTE ที่ดีขึ้นและสูงกว่าการปรับปรุง BTE ของน้ำมันดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกลุ่ม B100 คือ POB40 จะมี BTE สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ COB40 และต่ำสุดในกลุ่ม B40 ได้แก่ RBB20

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันไบโอดีเซลผสม B20 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ B20 สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 13.43%, 3.20% และ 1.37% สำหรับ POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 20.32%, 8.85% และ 9.05% สำหรับ POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัด 18 เท่ากับ 23.11%, 13.62% และ 10.04% สำหรับ POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ที่อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นทำให้เชื้อเพลิง B20 มีการปรับปรุงค่า BTE ที่ดีขึ้นและสูงกว่าการปรับปรุง BTE ของน้ำมันดีเซล เช่นเดียวกับกลุ่ม B40 ซึ่งค่า BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลนี้ เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนในสารผสมของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ถูกฉีดเข้าไป (John B. Heywood, 1998) ซึ่งออกซิเจนส่วนเกินในสารผสมนี้จะทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นช่วยลดการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงลงได้

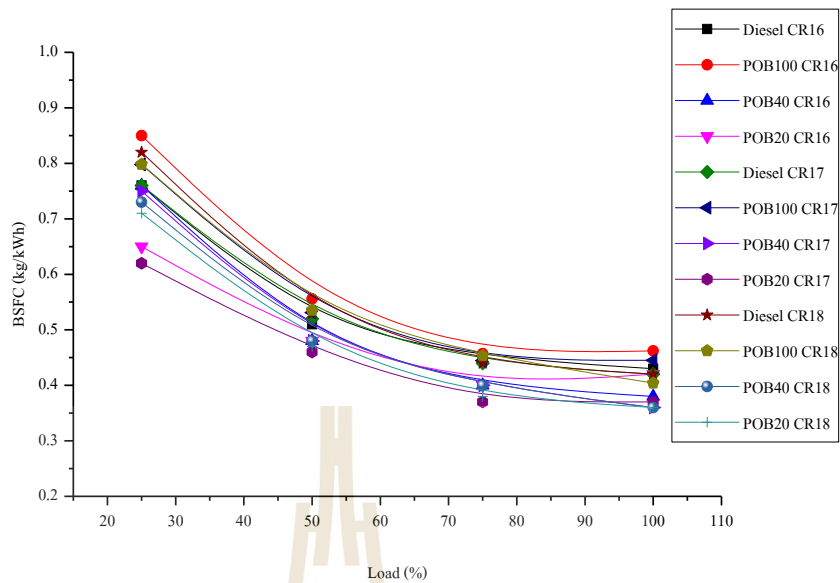
เมื่อนำมาเรียงจากค่ามากไปน้อยที่อัตราส่วนการอัด 18 จะพบว่า เชื้อเพลิงดีเซลผสมทั้งหมดจะมี BTE สูงกว่าน้ำมันดีเซลตามสัดส่วนดังต่อไปนี้ POB20 23.54%, POB40 21.54%, RBB20 13.62%, RBB40 12.88%, COB40 12.44%, COB20 10.04% จะเห็นเชื้อเพลิง POB20 และ POB40 มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเชื้อเพลิงอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากไบโอดีเซล POB20 และ POB40 มีการเผาไหม้ที่สูงในช่วง premixed combustion phase และช่วงการเผาไหม้ถัดมา Mixing-controlled combustion phase และ late combustion phase มีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.17 และ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนเชื้อเพลิง POB20 และ POB40 ที่เผาไหม้ได้มากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ และส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานจลน์สูงกว่าดีเซลผสมอื่น ๆ ในช่วง 10 องศาหลังจุดศูนย์ตายบน (TDC) ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.16 แสดงถึง POB40 และ POB20 มีการปลดปล่อยความดันในกระบอกสูบที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ



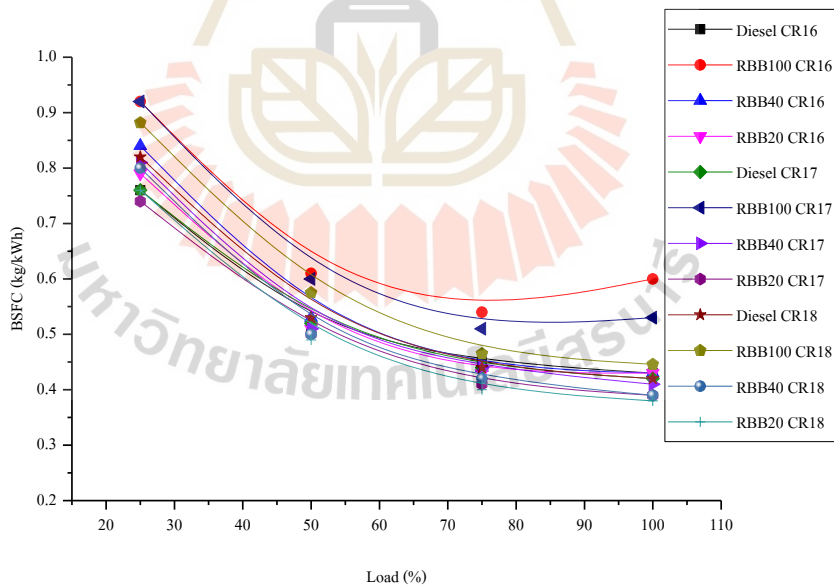
รูปที่ 4.25 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับโหลด ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



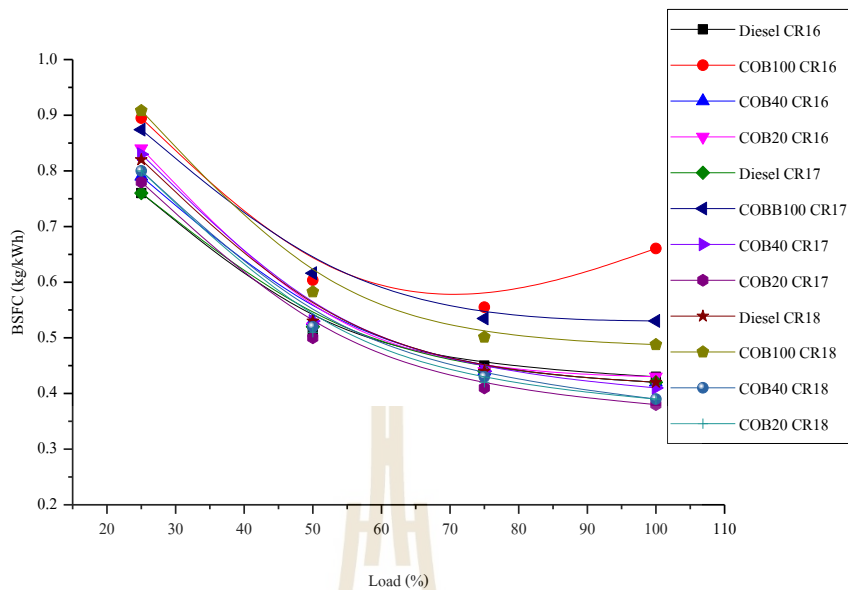
รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลดที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



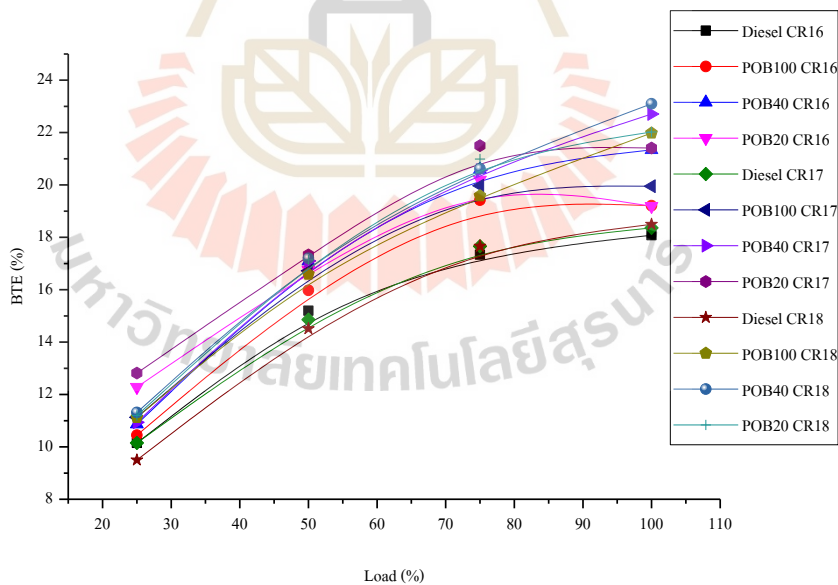
รูปที่ 4.27 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



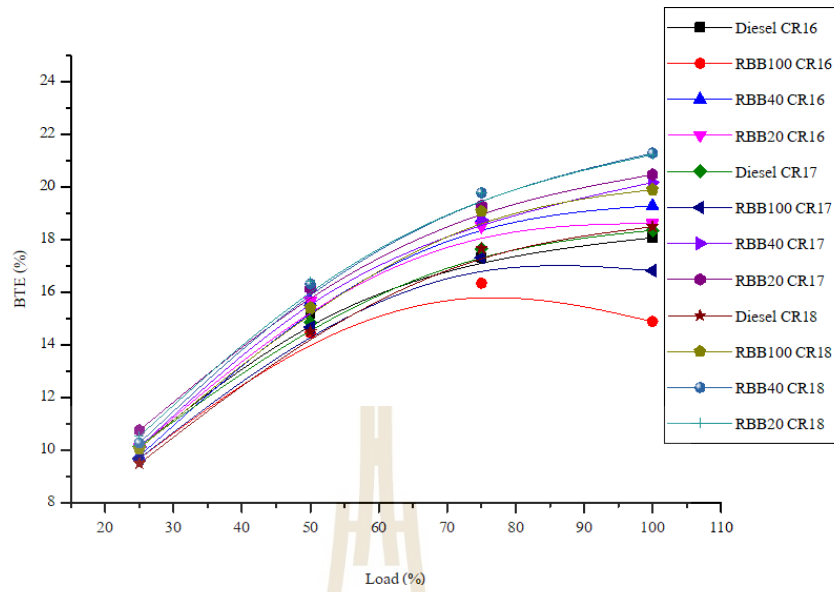
รูปที่ 4.28 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100, RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



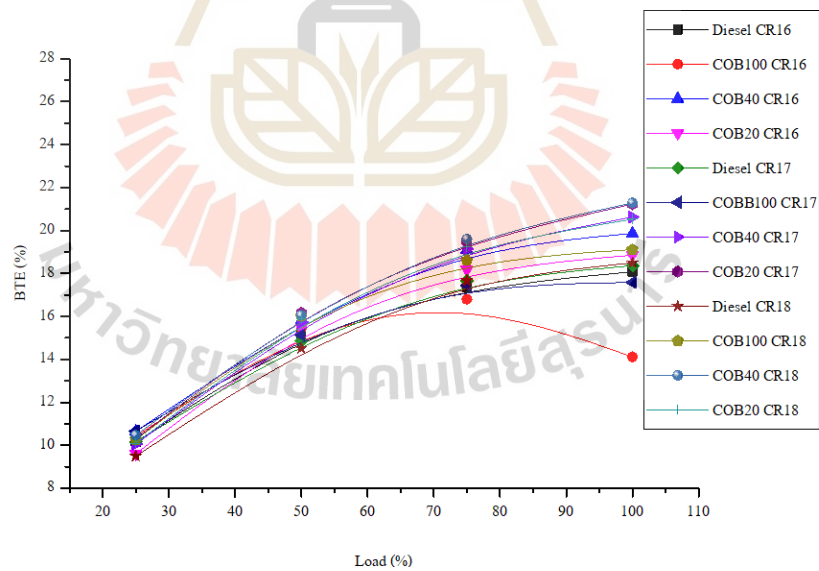
รูปที่ 4.29 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



รูปที่ 4.31 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) ที่โหลดสูงสุด

Load 100%	BSFC (kg/kWh)			ค่าการเปลี่ยนแปลง CR16-CR18	% ความเปลี่ยนแปลง
	CR16	CR17	CR18		
Diesel	0.43	0.42	0.42	-0.02	-2.33
POB100	0.46	0.45	0.40	-0.13	-12.60
POB40	0.38	0.36	0.36	-0.05	-5.26
POB20	0.42	0.37	0.36	-0.14	-14.29
RBB100	0.60	0.53	0.45	-0.26	-25.68
RBB40	0.43	0.41	0.39	-0.09	-9.30
RBB20	0.43	0.39	0.38	-0.12	-11.63
COB100	0.54	0.53	0.49	-0.09	-9.13
COB40	0.42	0.41	0.39	-0.07	-7.14
COB20	0.43	0.38	0.39	-0.09	-9.30
เฉลี่ย	0.45	0.42	0.40	-0.11	-10.67

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ที่โหลดสูงสุด

Load 100%	BTE (%)			ค่าการเปลี่ยนแปลง CR16-CR18	% ความเปลี่ยนแปลง
	CR16	CR17	CR18		
Diesel	18.08	18.36	18.50	0.02	2.32
POB100	19.21	19.95	21.98	0.14	14.42
POB40	21.34	22.71	23.10	0.08	8.24
POB20	19.19	21.41	22.02	0.15	14.75
RBB100	14.90	16.83	19.91	0.34	33.62
RBB40	19.30	20.18	21.29	0.10	10.31
RBB20	18.63	20.48	21.24	0.14	14.01
COB100	17.29	17.61	19.11	0.11	10.51
COB40	19.87	20.63	21.29	0.07	7.15
COB20	18.85	21.23	20.52	0.09	8.86
เฉลี่ย	18.67	19.94	20.90	0.12	12.42

#### 4.6 มลพิษไอเสีย

งานวิจัยนี้ทำการวัดการปล่อยมลพิษหลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์ ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide,  $\text{NO}_x$ ), คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide,  $\text{CO}_2$ ) และไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) ในการวัดการปล่อยมลพิษที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์หลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์นั้น ทำการวัดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบ/นาที โดยมีโหลดกับเครื่องยนต์ที่ 25%, 50%, 75% และ 100% ของกำลังเครื่องยนต์ที่สามารถผลิตได้สูงสุด 3.5 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที โดยมีการปรับอัตราส่วนการอัดเครื่องยนต์ทั้งหมด 3 อัตราส่วนการอัด ได้แก่ 16:1, 17:1 และ 18:1 และมีองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง 24 องศา ก่อนจุดศูนย์ตายบน โดยที่ทำการวัดค่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Testo รุ่น 350 ส่วนไฮโดรคาร์บอนใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Horiba รุ่น MEXA-584L และเครื่องมือวิเคราะห์ควันดำยี่ห้อ WAGER รุ่น DIGITAL SMOKE METER MODEL 6500

ซึ่งการทดสอบการปล่อยมลพิษนั้น ตัวแปรต้นจากการทดสอบ คือ ประเภทของน้ำมันเชื้อเพลิง 10 ประเภท ประกอบด้วย น้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม (POB100), น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว (RBB100), น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว (COB100), น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 20:80 %Vol. (POB20, RBB20, COB20), น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 40:60 %Vol (POB40, RBB40, COB40) ในขณะที่ตัวแปรควบคุม คือ เงื่อนไขในการวัดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งทำการวัดการปล่อยมลพิษที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบ/นาที และใช้เวลาในการวัดการปล่อยมลพิษที่ 120 วินาที ในส่วนสุดท้ายตัวแปรตาม คือ ปริมาณการปล่อยมลพิษทั้ง 4 ประเภทที่วัดออกมาได้ ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) และควันดำ

##### 4.6.1 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ )

จากรูปที่ 4.31 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ จากผลการทดสอบพบว่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 13.86, 19.17, -0.36, -2.91, -6.03, -20.54, -6.82, -11.85 และ -18.79 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 15.34, 17.74, 0.77, 2.56, 1.64, -6.11, -3.08, -2.01 และ -4.27 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20

มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ -5.38, 2.10, -12.68, -2.32, -7.38, -10.64, -2.75, -7.81 และ -11.71 ตามลำดับ

การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ มีค่าต่ำสุดในช่วงโหลด 25% และ 100% แต่สูงสุดในช่วงโหลด 50% และ 75% ซึ่งการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามโหลด เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สูงขึ้นและอุณหภูมิสูงตามอัตราการปลดปล่อยความร้อน ดังรูปที่ 4.10 อัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงในแต่ละองศาเพลาคือหัวข้อของเชื้อเพลิงดีเซลทั้ง 4 โหลด ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18 ซึ่งแสดงการปลดปล่อยความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของโหลด แต่สำหรับโหลด 100% แนวโน้มกลับมีค่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ลดลง เนื่องมาจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นที่โหลดสูงมีอัตราส่วนอากาศต่อน้ำมัน (Air-fuel ratio) ที่ต่ำลงหรือเรียกว่าการผสมแบบหนามากขึ้น (Rich mixtures) ซึ่งทำให้เกิดอัตราการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์นั้นลดลง

ผลการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่อการปรับอัตราส่วนการอัด ซึ่งการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ส่วนมากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) พบว่า การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัด ทำให้ห้องเผาไหม้มีความหนาแน่นและอุณหภูมิอากาศสูงขึ้นจึงทำให้เกิดความร้อนในการเผาไหม้ที่สูงขึ้นก่อให้เกิดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) สูงขึ้น (Bora et al., 2016) พบการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์น้อยที่สุด สำหรับน้ำเชื้อเพลิง COB40 อัตราส่วนการอัด 16 โดยเฉลี่ยทั้ง 4 โหลด มีการปล่อยที่ 265.96 ppm หรือต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล 12.43% จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการอัดจะทำให้เกิดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์โดยเฉลี่ยที่ทุกโหลดและเชื้อเพลิงทุกชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะเพิ่มขึ้น 13.11% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะเพิ่มขึ้น 16.33% และเฉลี่ยของการเพิ่มขึ้นทั้งหมดจากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 จะเพิ่มขึ้น 31.72%

เมื่อพิจารณาที่ประเภทเชื้อเพลิงในกลุ่มไบโอดีเซล (B100) ได้แก่ POB100, RBB100 และ COB100 จากผลการทดสอบพบว่า COB100 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 4.08% เนื่องมาจาก COB100 มีความหนืดที่ต่ำกว่ากับ 3.62 cSt ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 30.13% ทำให้สามารถสเปรย์เชื้อเพลิงไปได้ทั่วห้องเผาไหม้ อีกทั้งน้ำมันไบโอดีเซลมะพร้าว(COB100) มีกรดไขมัน(FAME) ประเภท Lauric acid (C12:0) 47.52%, Myristic acid (C14:0) 18.37%, Caprylic acid (C8:0) 7.60% และ Capric acid (C10:0) 6.14% ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้ที่มีโซ่คาร์บอนที่สั้นกว่าไบโอดีเซล POB100 และ RBB100 ทำให้มีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ง่ายและเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่องดังในรูปที่ 4.13 แสดงการเผาไหม้

ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) และช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) ที่ต่อเนื่องกันมากกว่าเชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B100) ชนิดอื่น ๆ และสำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 มีแนวโน้มการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ทั้ง 3 อัตราส่วนการอัด ซึ่ง POB100, RBB100 มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลโดยเฉลี่ย เท่ากับ 7.94%, 13.00% ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิง และคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งในกรณีของเชื้อเพลิง POB100 และ RBB100 มีความหนืดที่สูงกว่าดีเซล 15.52% และ 18.21% ตามลำดับ ซึ่งความหนืดที่สูงขึ้นทำให้การสเปรย์ของน้ำมันเชื้อเพลิงด้อยกว่าและมีผลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สูงขึ้นเนื่องจากการสเปรย์ส่งผลต่อการเผาไหม้ของบริเวณพื้นที่ ที่ไม่ได้ถูกผสมน้ำเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนนั้นบริเวณนี้ จะไม่ได้ถูกใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งเป็นอากาศที่ได้รับความร้อนสูงและเกิดบริเวณที่รวมตัวของออกซิเจนกับไนโตรเจนในอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนืดที่สูงขึ้นมีผลต่อการปล่อยมลพิษไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงขึ้นด้วย

เปรียบเทียบการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์น้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซลผสม B40 พบว่ามีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่าดีเซลเท่ากับ 0.88%, 3.92% และ 12.43% ของเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ และ POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่าดีเซลเท่ากับ 4.21%, 7.22% และ 11.58% ตามลำดับ การปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มีแนวโน้มสัมพันธ์กับประสิทธิภาพเชิงความร้อน ดังรูปที่ 4.24 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งพบว่า กลุ่ม POB40 และ POB20 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยทุกโหลดและทุกอัตราส่วนการอัด มีค่าสูงกว่า RBB40 และ RBB20 ซึ่งเชื้อเพลิงที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่ามักมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้น เชื้อเพลิง POB40 และ POB20 จึงมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่า RBB40 และ RBB20 ส่วนเชื้อเพลิง COB40 และ COB20 มีค่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากการผสมน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) กับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่าง ๆ ทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีความหนืดลดลงและค่าความร้อนเชื้อเพลิงลดลงจึงทำให้การเผาไหม้ปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ออกมาน้อยกว่าดีเซลและดีเซลผสมชนิดอื่น ๆ

#### 4.6.2 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO)

จากรูปที่ 4.32 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ พบว่า การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 18.58, 19.18, 8.25, -3.64, -2.32, -1.72, -4.64,

-1.07 และ -2.08 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 19.13, 23.23, 2.38, -2.95, -5.41, -11.93, -9.34, -2.77 และ -8.76 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 13.35, 17.49, -2.91, -6.49, -7.35, -23.37, -10.00, -2.89 และ -20.61 ตามลำดับ

การปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มโหลดการปลดปล่อย CO ใกล้เคียงกันที่โหลด 25%, 50% และสูงขึ้นเล็กน้อยที่โหลด 75% แต่ที่โหลด 100% มีการปล่อยออกมาสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากในโหลดสูงสุดเป็นโหลดที่ฉีดเชื้อเพลิงไปสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่สูงมาก ทำให้เกิดการเผาไหม้ในสภาวะอากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) สูงเป็นพิเศษ

ผลของการปรับอัตราส่วนการอัดต่อการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง, ปริมาณออกซิเจน, การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง, อุณหภูมิของอากาศ จากผลการทดสอบพบว่า การปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด เนื่องจากความร้อนในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ซึ่งทำให้การปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นพบการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์น้อยที่สุด สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง COB40 อัตราส่วนการอัด 18 โดยเฉลี่ยทั้ง 4 โหลด มีการปล่อยที่ 917.75 ppm จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการอัดจะทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์โดยเฉลี่ยที่ทุกสภาวะ โหลด และเชื้อเพลิงทุกชนิด มีแนวโน้มลดลงจากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะลดลง 13.59% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะลดลง 12.09% และเฉลี่ยจากการลดลงทั้งหมด จากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 ลดลงทั้งหมด 24%

เปรียบเทียบการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ของดีเซลและไบโอดีเซล (B100) จากผลการทดสอบพบว่า กลุ่มเชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B100) จะมีการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล มีค่าเท่ากับ 17.02%, 20.68% และ 2.57% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลกระทบของความหนืดของเชื้อเพลิงที่มีต่อคุณภาพของการสเปรย์น้ำมันเชื้อเพลิงคาดว่าจะเพิ่มปริมาณ CO ด้วยเชื้อเพลิงน้ำมันพืช (Devan PK., 2009) และค่าเอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอของไบโอดีเซล (B100) มีค่าที่สูงกว่าดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) มีค่าความหนืดที่ต่ำและมีองค์ประกอบน้ำมันเชื้อเพลิงที่เบากว่าน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ชนิดอื่น ๆ ดังในตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบร้อยละการเพิ่มขึ้น-ลดลงของคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมัน จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

ชนิดอื่น ๆ แต่ไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) ยังมีค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ด้อยกว่าน้ำมันดีเซล เช่น ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ที่ต่ำกว่าจึงทำให้ที่อัตราส่วนการอัด 16 ที่มีความร้อนและความหนาแน่นของอากาศในห้องเผาไหม้มีค่าต่ำ ซึ่งทำให้มีการเผาไหม้ได้ไม่ดีนัก จึงมีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ สูงกว่าน้ำมันดีเซล 8.24% ที่อัตราส่วนการอัด 16 และ 2.38% ที่อัตราส่วนการอัด 17 แต่มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 2.91% ที่อัตราส่วนการอัด 18

เปรียบเทียบการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ดีเซลกับไบโอดีเซลผสม B40 และ B20 จะมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจะเป็นสัดส่วนเทียบกับดีเซลเฉลี่ยทุกโหลดและทุกอัตราส่วนการอัด โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงที่มีการลดลงมากที่สุด COB40 12.34%, COB20 10.48%, POB20 8.00%, RBB40 5.03%, POB40 4.36% และลดลงน้อยที่สุดสำหรับ RBB40 2.24% ซึ่งโดยทั่วไปน้ำมันไบโอดีเซลนั้นมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เนื่องจากปริมาณ โมเลกุลออกซิเจนที่มีอยู่ในไบโอดีเซลจะช่วยในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Dubey et al., 2018)

#### 4.6.3 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC)

การปล่อยไฮโดรคาร์บอน เปลี่ยนแปลงไปตามโหลดที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.33 การปล่อยไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ พบว่ามีการปล่อยการปล่อยไฮโดรคาร์บอนที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 13.14, 13.64, 3.18, -4.83, -1.33, -5.56, -8.57, -2.70 และ -2.70 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยไฮโดรคาร์บอน มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 7.24, 9.23, -1.44, -9.82, -6.02, -11.90, -11.02, -10.16 และ -6.82 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 4.55, 6.67, -5.88, -6.78, -5.00, -22.33, -12.50, -9.57 และ -16.67 ตามลำดับ

การปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามโหลดที่เพิ่มขึ้นตามอัตรา การไหลเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น การปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนจะใกล้เคียงกันที่โหลด 25%, 50% และ สูงขึ้นที่โหลด 75% และสูงสุดที่โหลด 100% มีการปล่อยออกมาสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจาก ในโหลดนี้เป็น โหลดที่ฉีดเชื้อเพลิงไปสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่สูงมาก ทำให้เกิดการเผาไหม้ โดยที่อากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ทำให้เกิดการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนสูงเป็นพิเศษ เช่นเดียวกับการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และในโหลดสูงสุดมีการฉีดเพลิงในช่วง การเผาไหม้ควบคุมเพิ่มขึ้นสูงกว่าโหลดอื่น ๆ จึงทำให้เชื้อเพลิงส่วนหลังที่รอการเผาไหม้สูงขึ้น

และหลงเหลือจากการเผาไหม้มากขึ้นจึงทำให้โพลสูงที่สุดไม่ได้มีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดในบางน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องมาจากเชื้อเพลิงบางชนิดเผาไหม้ได้ช้าและไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดจึงเกิดการสูญเสียเชื้อเพลิงบางส่วนไปในช่วงการเผาไหม้ช้าเพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 4.13 ที่โพล 100% มีปลดปล่อยความร้อนในช่วงท้ายเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น CO, HC ฯลฯ)

ผลการปรับอัตราส่วนการอัดตัวต่อการปล่อยไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรคาร์บอนคือสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือไม่เกิดการเผาไหม้ จากผลการทดสอบพบว่า การปล่อยไฮโดรคาร์บอนลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด ส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง (ดังในรูปที่ 4.11 การลดลงความล่าช้าในการจุดระเบิดต่อการปรับอัตราส่วนการอัดเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงทั้ง 10 ชนิด) ความล่าช้าในการจุดระเบิดส่งผลโดยตรงต่อการลดมลพิษ HC (Bora et al., 2016; Dubey et al., 2018) ทำให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกกับโพล ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่ดีที่สุดทำให้การปล่อยไฮโดรคาร์บอนลดลง พบการปล่อยไฮโดรคาร์บอนน้อยที่สุด สำหรับน้ำเชื้อเพลิง COB40 อัตราส่วนการอัด 18 โดยเฉลี่ยทั้ง 4 โพล มีการปล่อยที่ 25.75 ppm จากการทดสอบพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการอัด จะทำให้เกิดการปล่อยไฮโดรคาร์บอนโดยเฉลี่ยที่ทุกสภาวะโพลและเชื้อเพลิงทุกชนิด มีแนวโน้มลดลง จากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะลดลง 11% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะลดลง 13.01% และเฉลี่ยจากการลดลงทั้งหมด จากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 ลดลง 22.56%

เปรียบเทียบการปล่อยไฮโดรคาร์บอนเปรียบเทียบดีเซลและไบโอดีเซล (B100) ได้แก่เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100 จากผลการทดสอบพบว่า COB100 มีการปล่อยไฮโดรคาร์บอนที่ต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อย เท่ากับ 1.38% มีองค์ประกอบหลักเป็น Lauric acid (C12:0) 47.52%, Myristic acid (C14:0) 18.37%, Caprylic acid (C8:0) 7.60% และ Capric acid (C10:0) 6.14% ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีไฮโดรคาร์บอนที่สั้นกว่า ซึ่งทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ง่ายและเผาไหม้หมดได้เร็วกว่าเชื้อเพลิงจากไบโอดีเซลปาล์มไบโอดีเซลรำข้าวและมีการเผาไหม้ที่หมดจดกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และสำหรับเชื้อเพลิง POB100 และ RBB100 การปล่อยไฮโดรคาร์บอนสูงกว่าน้ำมันดีเซลค่าเท่ากับ 8.31% และ 9.84% ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติความหนืดและความถ่วงจำเพาะที่สูงที่มีผลต่อการเผาไหม้ที่ด้อยกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากปาล์มและรำข้าวมีองค์ประกอบกรดไขมันชนิด Palmitic acid (C16:0), Oleic acid (C18:1n9c) และ Linoleic acid (C18:2n6c) เป็นหลัก ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอนพันธะโซ่ยาวและมีพันธะคู่ 1 คู่สำหรับ Oleic acid และพันธะคู่ 2 คู่ สำหรับ Linoleic acid ซึ่งกรดไขมันที่มีโซ่ยาวและมีพันธะคู่จะทำให้การเผาไหม้

ที่ยาวนานกว่าเชื้อเพลิงที่มีโซคาร์บอนที่สั้นกว่า จึงทำให้น้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มและรำข้าว มีไฮโดรคาร์บอนหลงเหลือจากการเผาไหม้สูงกว่าดีเซล

เปรียบเทียบการปล่อยไฮโดรคาร์บอนเปรียบเทียบดีเซลและดีเซลผสม B40 และ B20 ได้แก่ เชื้อเพลิง POB40, POB20, RBB40, RBB20, COB40 และ COB20 จากผลการทดลอง พบว่า การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ของเชื้อเพลิงผสม จะมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล การปล่อยไฮโดรคาร์บอนลดลงจะเป็นสัดส่วนเทียบกับดีเซลเฉลี่ยทุกโหลดและทุกอัตราส่วนการอัด ซึ่งเชื้อเพลิงดีเซลผสม โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงที่มีการลดลงมากที่สุด คือ COB40 13.26%, POB20 10.70%, COB20 8.73%, RBB20 7.47%, POB40 6.14% และลดลงน้อยที่สุดสำหรับ RBB40 4.12% ซึ่งเป็นผลกระทบจากการผสมไบโอดีเซลช่วยในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลผสม มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลงและส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเนื่องจากมีการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีระยะเวลามากขึ้นและจะทำให้เชื้อเพลิงส่วนในช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุม โดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) เผาไหม้ได้มากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 4.15 แสดงอัตราการปลดปล่อยความร้อนและความดันเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างดีเซลและดีเซลผสม(B40) ที่อัตราส่วนการอัด 18 ที่มีช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุม โดยการผสมสูงขึ้นตามความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลง จึงทำให้เกิดไฮโดรคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ลดลงด้วย

#### 4.6.4 การปล่อยควัน (Smoke Opacity)

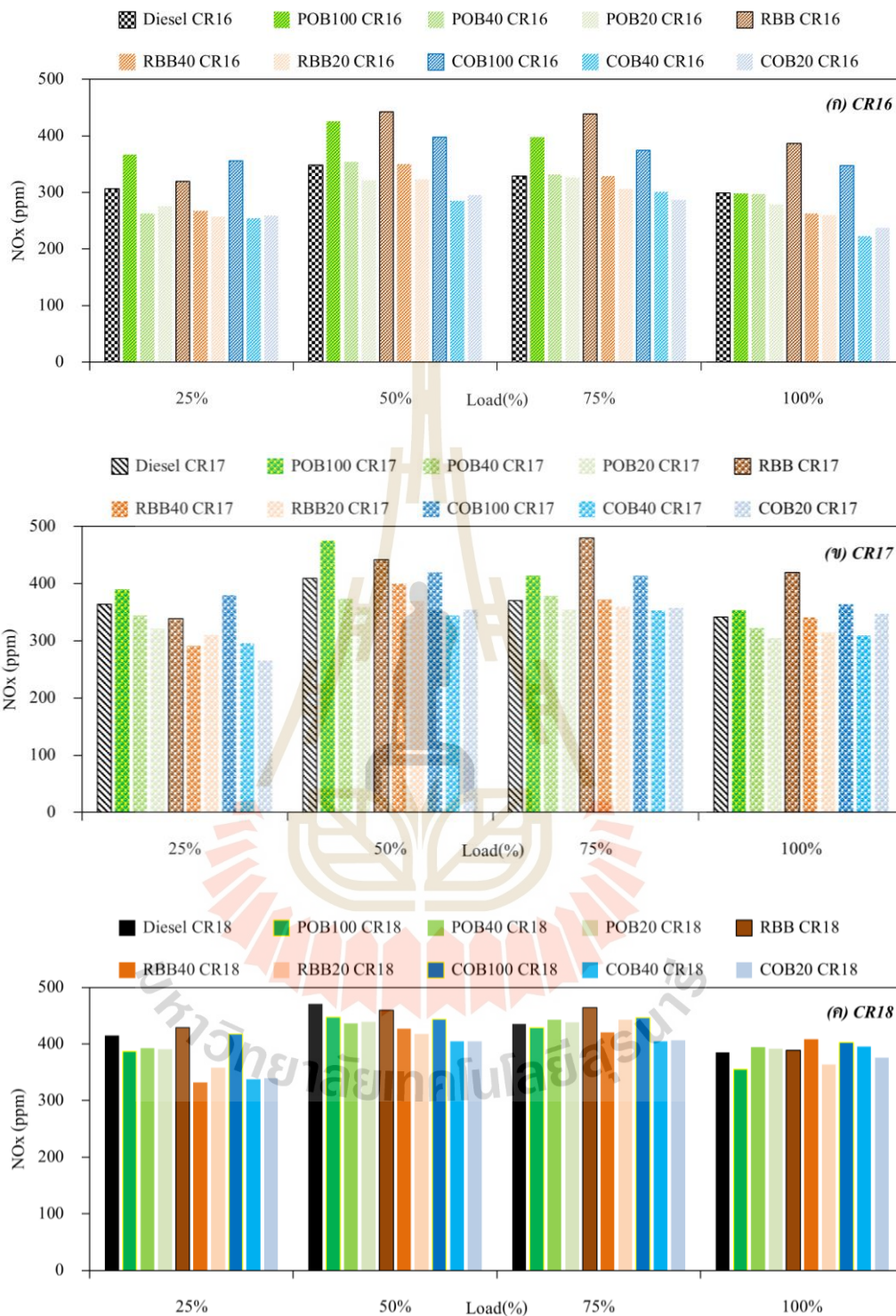
การปล่อยควันเกิดจากเขม่าคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้สารระเหยรวม ทั้งการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมัน จากรูปที่ 4.34 การปล่อยควัน (Smoke opacity) ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่ต่าง ๆ จากผลการทดสอบพบว่า การปล่อยการปล่อยควัน ที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยควันลดลงจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 59.32, 52.43, 186.23, 127.42, 117.76, 107.35, 70.91, 42.42 และ 95.83 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยควันลดลงจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 68.32, 71.52, 188.14, 196.51, 110.74, 150.00, 114.89, 109.88 และ 109.88 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยควันลดลงจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 95.12, 114.93, 250.36, 266.41, 118.18, 177.46, 232.18, 163.74 และ 116.22 ตามลำดับ



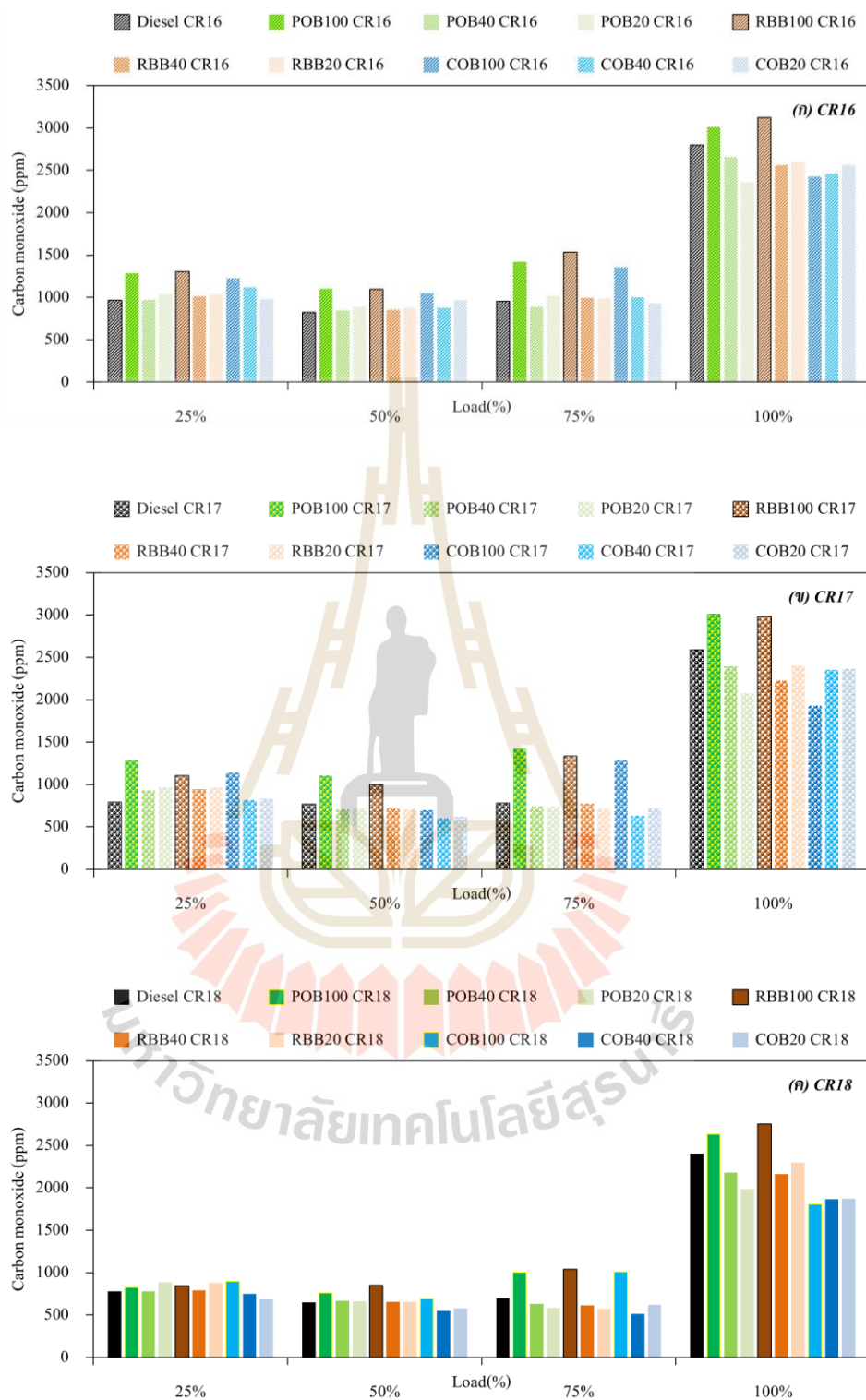
เมื่อเพิ่มโหลดปริมาณของควันก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ เนื่องจากมีเชื้อเพลิงมากขึ้นในห้องเผาไหม้แต่ปริมาณอากาศเท่าเดิมทำให้เป็นสัดส่วนผสมแบบหนามากขึ้น ส่งผลให้มีน้ำมันที่หลงเหลือจากการเผาไหม้มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของโหลด

ผลการปรับอัตราส่วนการอัดต่อการปล่อยควันการปล่อยควันสามารถเกิดจากเขม่าคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้สารระเหยรวมทั้งการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมัน จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดสูงขึ้นพบว่าการปล่อยควันจะลดลงแสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นพบการปล่อยควันน้อยที่สุด สำหรับน้ำเชื้อเพลิง POB40 อัตราส่วนการอัด 18 โดยเฉลี่ยทั้ง 4 โหลด มีการปล่อยควันที่ 3.275% จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการอัดจะทำให้เกิดการปล่อยควันโดยเฉลี่ยที่ทุกโหลดและเชื้อเพลิงทุกชนิด มีแนวโน้มลดลงจากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะลดลง 19.832% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะลดลง 19.32% และเฉลี่ยจากการลดลงทั้งหมด จากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 ลดลง 34.73%

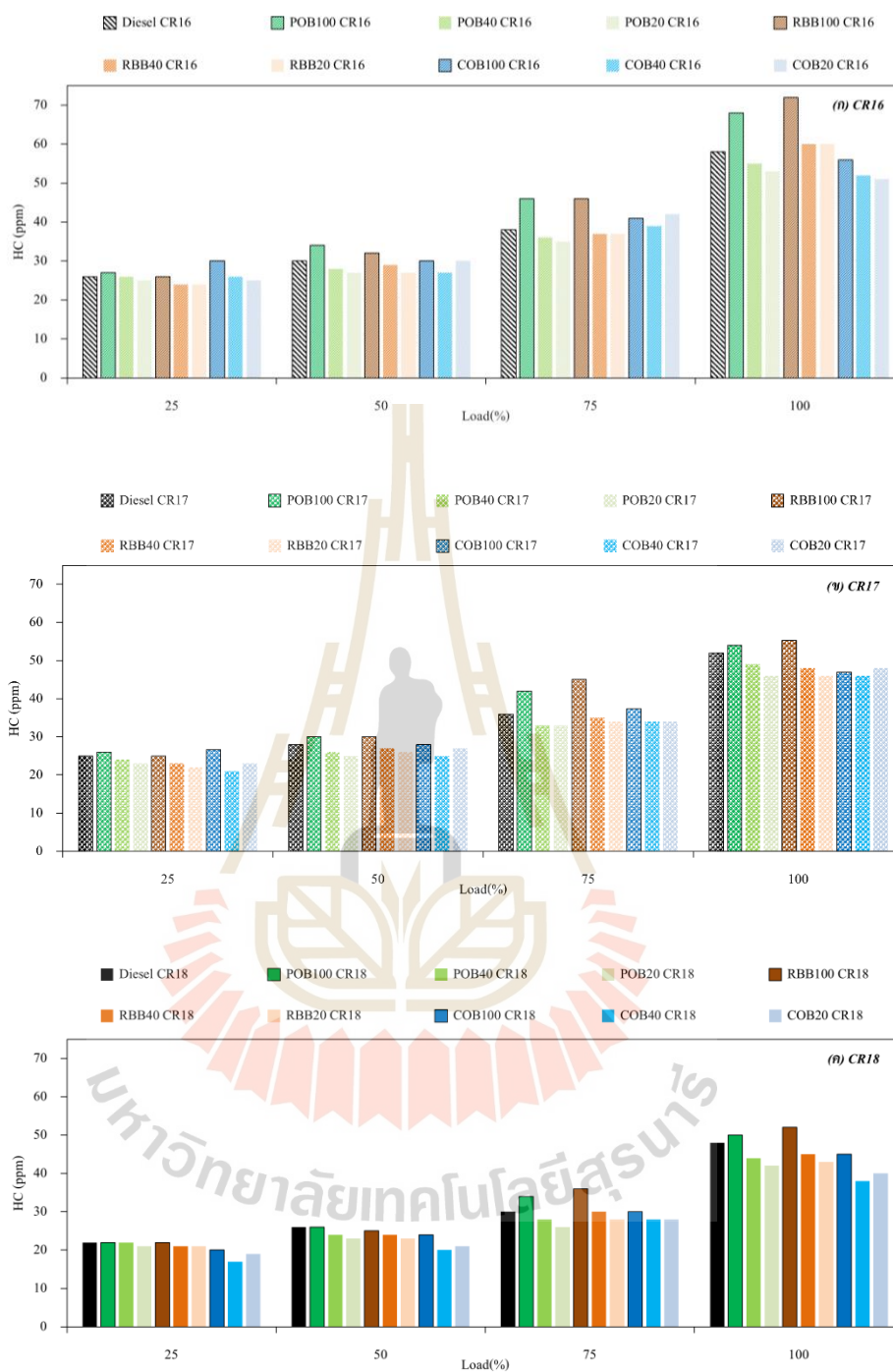
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลและกลุ่มเชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B100) และน้ำมันดีเซลผสมพบว่าน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B40 และ B20) จะปล่อยควันต่ำกว่าดีเซลในทุกโหลด โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงที่มีการลดลงมากที่สุด คือ COB100 208.26%, RBB100 79.63%, POB100 74.25% และสำหรับเชื้อเพลิงดีเซลผสมมีค่าการปล่อยควันลดลงโดยเริ่มจากเชื้อเพลิงดีเซลผสมที่มีการลดลงมากที่สุด คือ POB40 196.78%, COB40 144.94%, POB20 139.33%, RBB40 115.56%, COB20 107.31, RBB20 105.35% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ช่วยลดควันได้เป็นอย่างดี



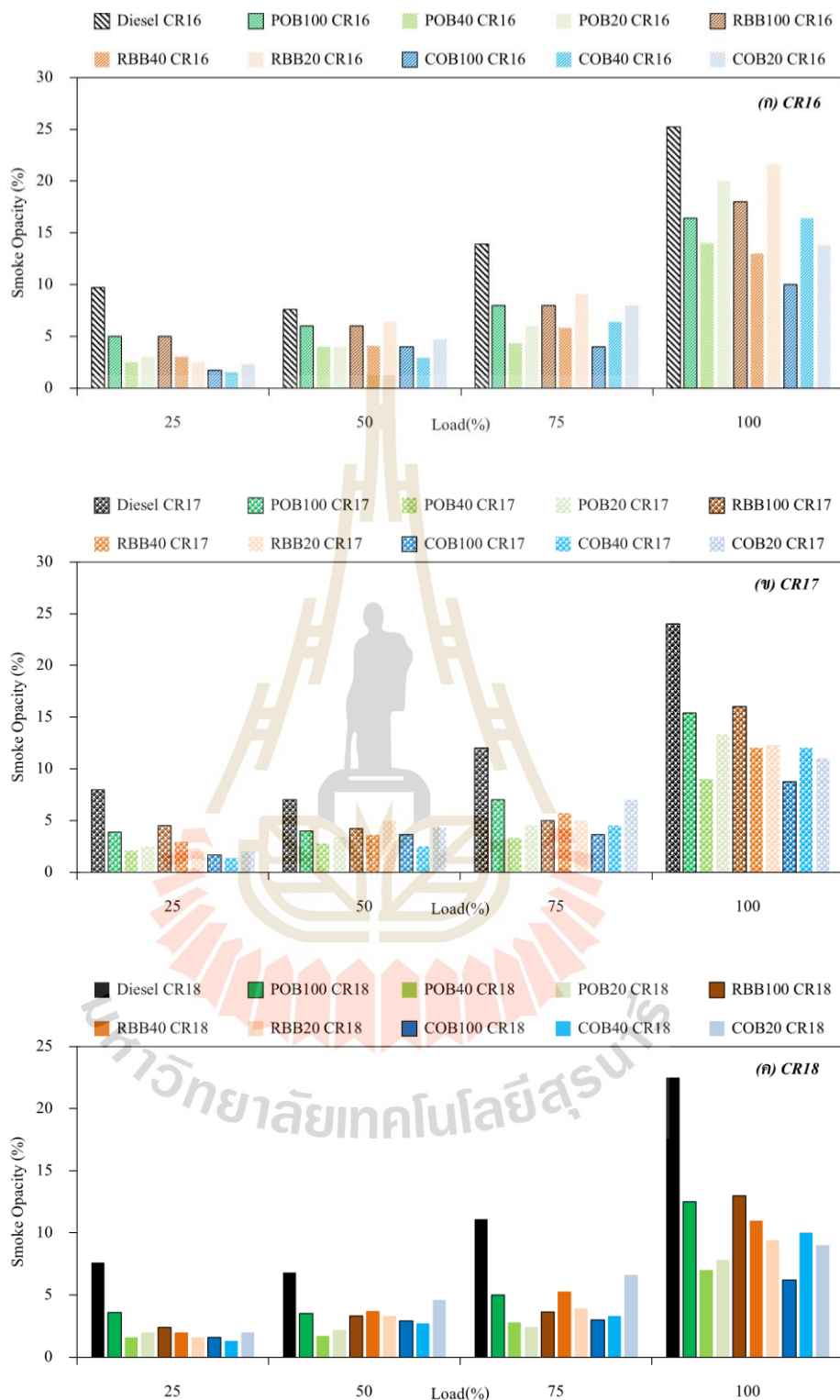
รูปที่ 4.33 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของเชื้อเพลิงทดสอบที่โหลดและอัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



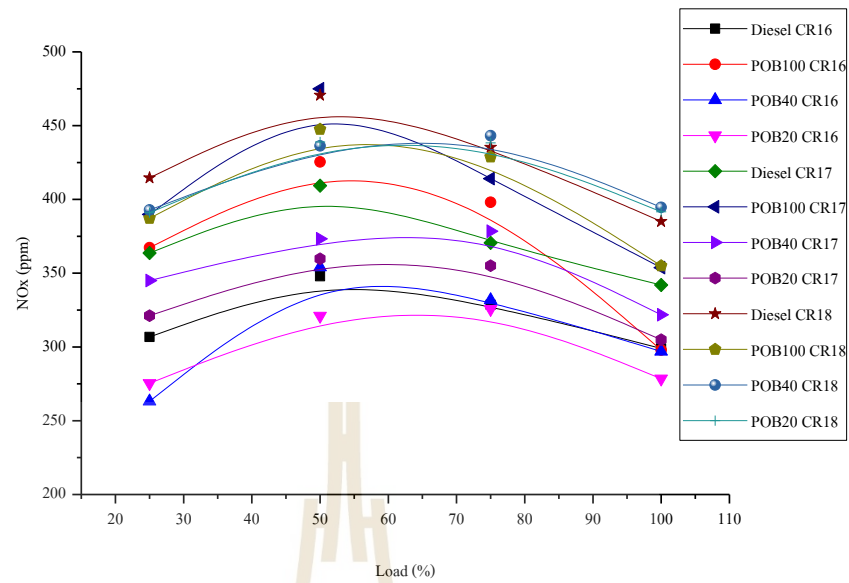
รูปที่ 4.34 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ของเชื้อเพลิงทดสอบที่โหลดและอัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



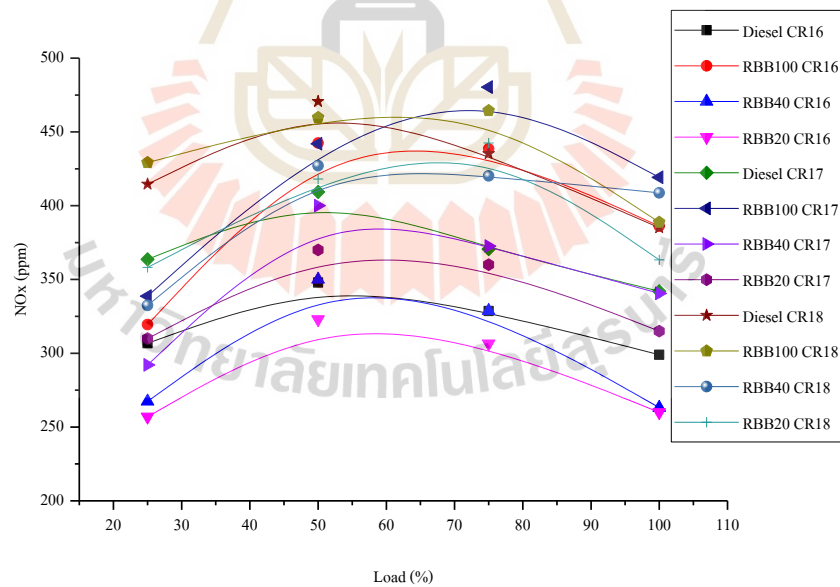
รูปที่ 4.35 การปล่อยไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงทดสอบที่โหลดและอัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



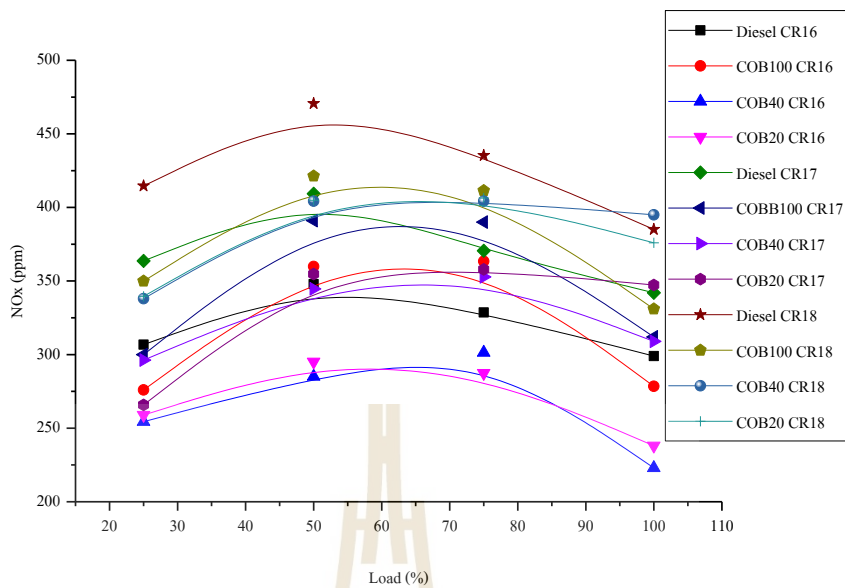
รูปที่ 4.36 การปล่อยควันของเชื้อเพลิงทดสอบที่โหลดและอัตราส่วนการอัดต่าง ๆ



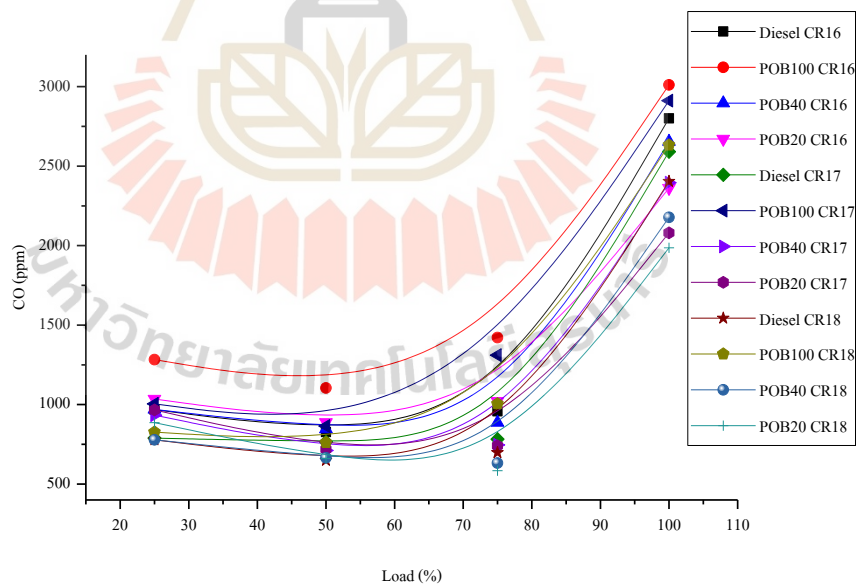
รูปที่ 4.37 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) กับ โหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



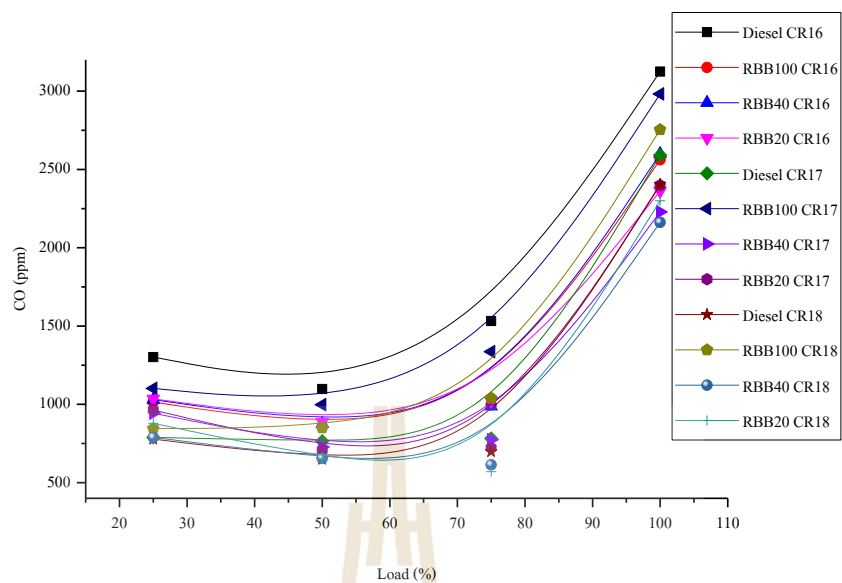
รูปที่ 4.38 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) กับ โหลดของเชื้อเพลิง RBB100, RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



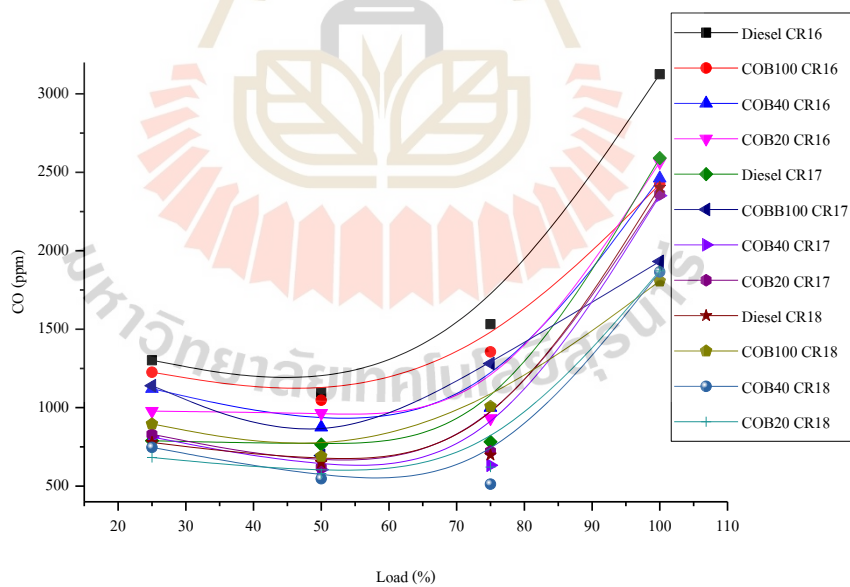
รูปที่ 4.39 การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) กับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



รูปที่ 4.40 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับโหลดของเชื้อเพลิง POB100, POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18

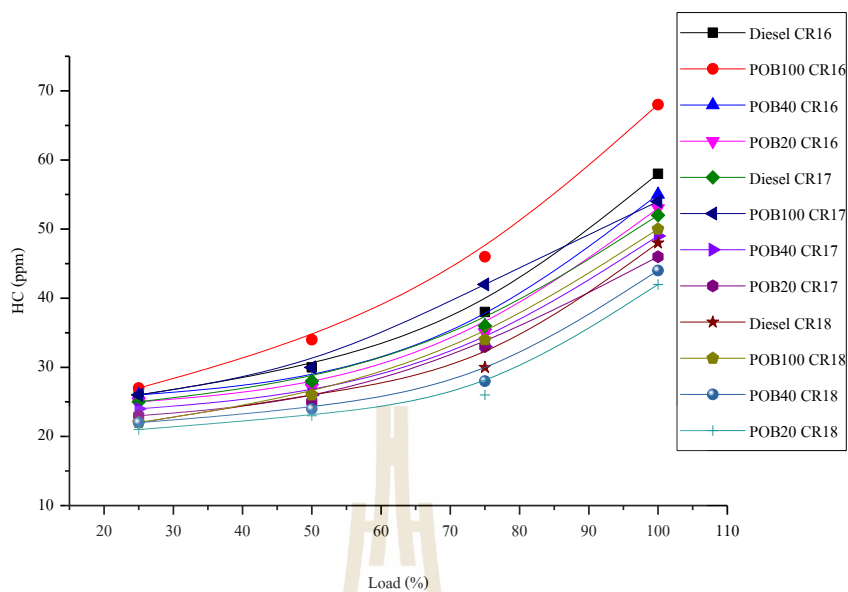


รูปที่ 4.41 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับ โหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18

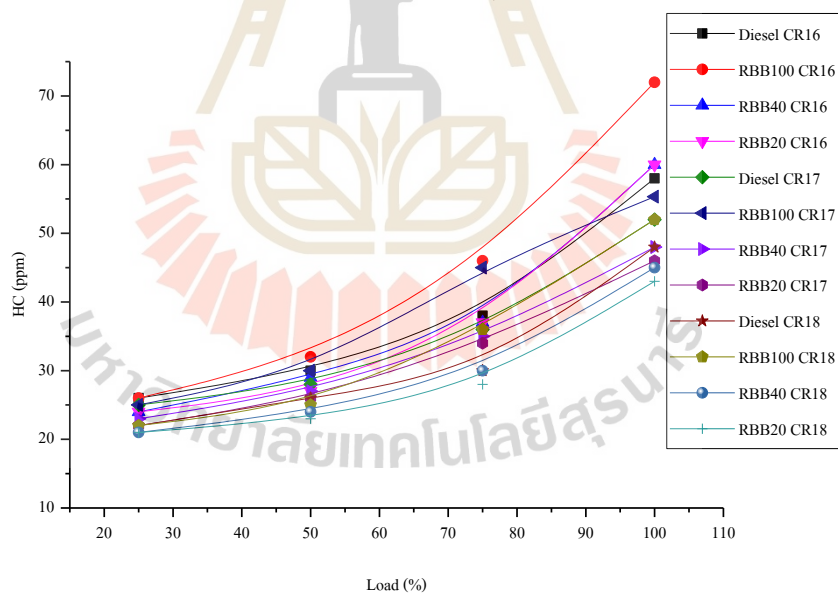


รูปที่ 4.42 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับ โหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18

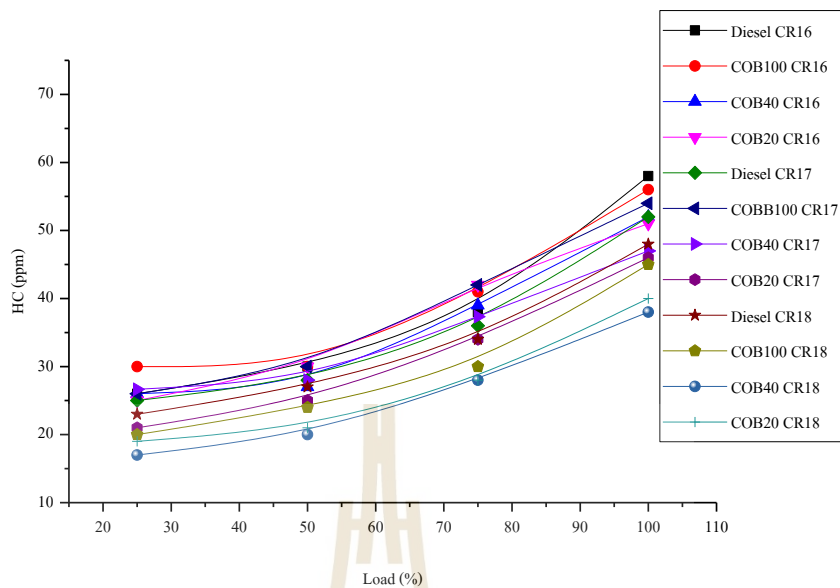




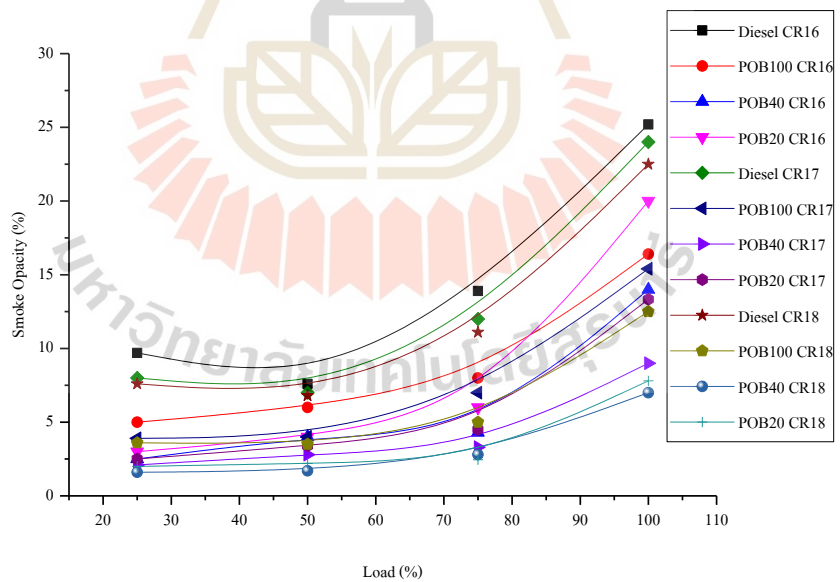
รูปที่ 4.43 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) กับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



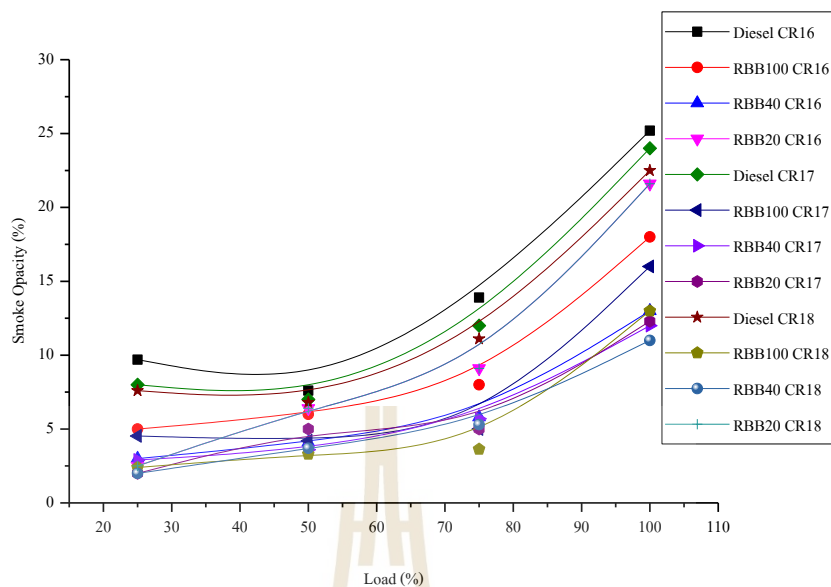
รูปที่ 4.44 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) กับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



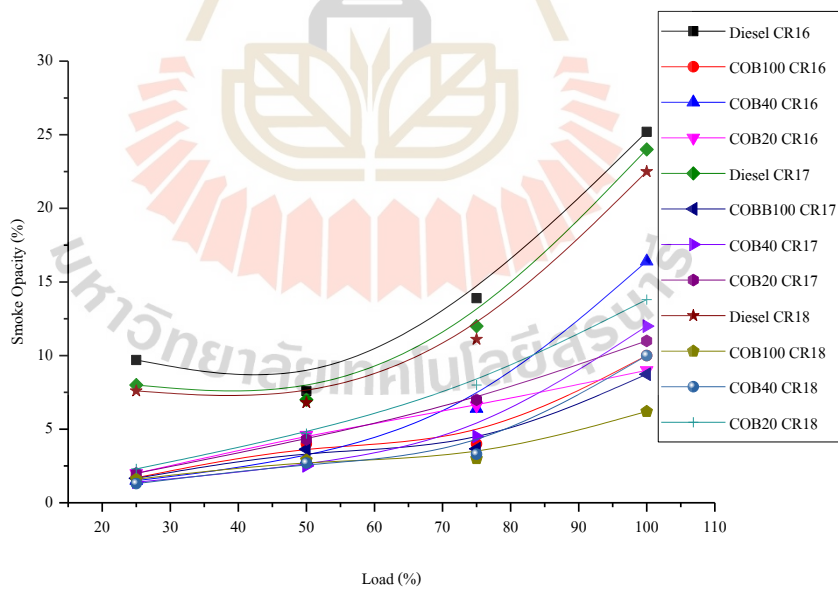
รูปที่ 4.45 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) กับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



รูปที่ 4.46 การปล่อยควัน (Smoke Opacity) กับโหลดของเชื้อเพลิง POB100 POB40 และ POB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



รูปที่ 4.47 การปล่อยควัน (Smoke Opacity) กับโหลดของเชื้อเพลิง RBB100 RBB40 และ RBB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18



รูปที่ 4.48 การปล่อยควัน (Smoke Opacity) กับโหลดของเชื้อเพลิง COB100 COB40 และ COB20 เทียบกับน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วนการอัด 16, 17 และ 18

#### 4.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าว ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์นี้ เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจาก น้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าว ซึ่งในที่นี้การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจะเป็นจะเป็นไป ตามเงื่อนไขขอบเขตของงานวิจัยนี้ คือใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ในรูปแบบ การทดลองในห้องปฏิบัติการโดยจะคิดเป็นต้นทุนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบกับราคาของน้ำมันดีเซลที่ขายทั่วไปตามท้องตลาด รวมถึงการแสดงข้อดีและ ข้อเสียของน้ำมันไบโอดีเซลจากพืชทั้ง 3 ชนิด

จากงานวิจัยนี้ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่จะนำมาวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์มีตัวอย่าง น้ำมันเชื้อเพลิง 3 ประเภท ได้แก่ ไบโอดีเซลปาล์ม (POB100), ไบโอดีเซลรำข้าว (RBB100) และ ไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) โดยต้นทุนของน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภทที่เปรียบเทียบกับ น้ำมันดีเซลนั้นคิดออกมาในหน่วยราคาต่อปริมาณ 1 ลิตร ซึ่งผลที่ได้จากการคิดราคาต้นทุนของ น้ำมันไบโอดีเซลจะเป็นไปดังตารางที่ 4.10 ตารางแสดงต้นทุนของสารตั้งต้นและสารเคมีสำหรับ การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณ 1 ลิตร

จากตารางที่ 4.12 ต้นทุนของน้ำมันไบโอดีเซลแต่ละประเภทเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า ไบโอดีเซลปาล์ม (POB100) มีราคาต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลชนิดอื่น ๆ เนื่องจากความแตกต่าง ในด้านราคาของน้ำมันพืชจากปาล์มนั้นมีราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลมาจาก ประเทศไทยมีการปลูกปาล์มเป็นจำนวนมากและมีน้ำมันปาล์มในตลาดเป็นจำนวนมาก แต่สำหรับ ไบโอดีเซลจากรำข้าวมีราคาต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูงเนื่องจากน้ำมันรำข้าวมักถูกนำไปใช้ใน ทางด้านเสริมโภชนาการทางอาหารไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมและน้ำมันพืชที่ใช้ทอด ที่ใช้อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ ทำให้มีราคาสูงส่งผลให้มีราคาต้นทุนแพงที่สุดในการ นำมาผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้

ตารางที่ 4.11 ต้นทุนของน้ำมันพืชและสารเคมีสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณ 1 ลิตร

ต้นทุนของน้ำมันปาล์มดิบและสารเคมี					
สารตั้งต้นหรือสารเคมี	ปริมาณต่อ หน่วย (ml หรือ g)	ราคาต่อ หน่วย (บาท)	ปริมาณที่ใช้ จริง (ml หรือ g)	ต้นทุน (บาท)	ปีข้อมูล
น้ำมันปาล์ม	1000	18.81	1000	18.81	ก.ค.-63
น้ำมันรำข้าว	1000	60	1000	60	2563
น้ำมันมะพร้าว	1000	22.73	1000	22.73	2562
เมทานอล	1000	39	229.35	8.94465	2563
สารเร่งปฏิกิริยา (โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์)	1000	68	10	0.68	2563
เครื่องกวนผสมสาร	550	2.3488	1.1	2.5837	-

หมายเหตุ ต้นทุนค่าไฟฟ้าคิดในอัตราค่าไฟฟ้าในประเภทบ้านที่อยู่อาศัย ซึ่งมีราคา 2.3488 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ 4.12 ต้นทุนของน้ำมันไบโอดีเซลแต่ละประเภทเทียบกับน้ำมันดีเซล

ประเภทของน้ำมันเชื้อเพลิง	ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง (บาทต่อลิตร)
น้ำมันดีเซล	22.59 (เดือนกรกฎาคม 2563)
POB100	31.02 (แพงกว่าดีเซล 37.31%)
RBB100	72.21 (แพงกว่าดีเซล 219.64%)
COB100	34.94 (แพงกว่าดีเซล 54.66%)

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล (Compression Ignition Engine) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากเป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดน้ำมัน มีความทนทาน และสามารถใช้งานในการบรรทุก เครื่องยนต์ดีเซล จึงถูกนำมาใช้ ในเชิงพาณิชย์ จำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นรถบรรทุกขนส่งสินค้า รถแทรกเตอร์ เครื่องยนต์ทำการเกษตร และเรือประมงความต้องการใช้เชื้อเพลิงดีเซลจึงมากขึ้นไปด้วย แต่เครื่องยนต์ดีเซลมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลนั้นมีการปลดปล่อยปริมาณ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>x</sub>), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และควันดำ (Smoke) จำนวนมากจากไอเสียการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาไบโอดีเซลสามารถผสมในน้ำมันดีเซลเพื่อให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลผสมเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นพิษน้อยกว่าน้ำมันดีเซลธรรมดา และเมื่อผสมกับดีเซลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์ และไบโอดีเซลยังสามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชภายในประเทศซึ่งจะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศได้ รวมทั้งยังช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิล ช่วยรักษาเสถียรภาพของสินค้าทางการเกษตร และยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไบโอดีเซลสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ในด้านการปรับปรุงพารามิเตอร์ การปรับอัตราส่วนการอัด มีผลกระทบอย่างมากต่อ ประสิทธิภาพ และการปลดปล่อยมลพิษ ของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง และได้มีเทคโนโลยีใหม่ๆ มาพัฒนาและแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องมีศึกษาการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การออกแบบเครื่องยนต์ที่มีผลต่อเชื้อเพลิงแต่ละแบบอย่างเหมาะสม. ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจทำการศึกษการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ ปาล์ม มะพร้าว และรำข้าว โดยใช้กระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และการวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงต่าง ๆ ประกอบด้วยความถ่วงจำเพาะ ความหนืด ความหนาแน่นการกลั่น ดัชนีซีเทน และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง รวมทั้งความบริสุทธิ์ เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลในกรณีต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาในข้างต้น และการศึกษาผลจากการนำน้ำมันไบโอดีเซลจากพืชทั้ง 3 ชนิด มาผสมกับดีเซลในสัดส่วน 20%, 40% เรียกว่า “B20” และ “B40” ตามลำดับ ตลอดจนทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับค่าอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลจาก

น้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด ที่มีต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งจากงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงความเหมาะสมและประสิทธิภาพของน้ำมันแต่ละชนิดมากยิ่งขึ้น โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงโหลดของเครื่องยนต์และอัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยทั้งหมดได้ดังนี้

### 5.1.1 การผลิตและผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล คือ น้ำมันพืช 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันรำข้าว และน้ำมันมะพร้าว ซึ่งจากการสืบค้นพบว่าน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 846.94 กรัม/โมล, 868.05 กรัม/โมล, 661.67 กรัม/โมล ตามลำดับ และใช้เมทานอลเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีการกำหนดอัตราส่วน โมลเมทานอลต่อน้ำมันแต่ละชนิดแตกต่างกันตามการสืบค้นข้อมูลพบว่า ในน้ำมันปาล์มและมะพร้าวใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 โมล ส่วนน้ำมันรำข้าวใช้ 9:1 โมล และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์หนักร้อยละ 1 ของน้ำหนักน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากผลการทดลองพบว่า ในการทดลองทั้ง 9 ครั้ง จะได้ผลการทดลองออกมาเป็นปริมาณของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม (POB) น้ำมันรำข้าว(RBB) และน้ำมันมะพร้าว (COB) จะได้อัตราการเกิดน้ำมันเฉลี่ย 96.36, 89.39 และ 90.28 ตามลำดับ

การทดสอบนี้ก็จะทำให้เราทราบถึงค่าความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งในการทดสอบใช้เครื่องมือเรียกว่า “โครมาโทกราฟี (Chromatography)” ภายใต้มาตรฐาน EN 14103 ซึ่งในการทดลองนี้ จากการคำนวณเพื่อหามวลโมเลกุลของ POB100, RBB100 และ COB100 มีค่าเท่ากับ 285.604, 289.64 และ 226.90 กรัม/โมล ตามลำดับ และ พบกรดไขมันของมวลน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง 74.39%, 70.65% และ 75.85% ตามลำดับ และต่ำกว่ามาตรฐาน 22.11%, 25.85%, 20.65% ตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง การกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556 ควรมีค่าเมทิลเอสเทอร์ไม่ต่ำกว่า 96.5% โดยน้ำหนัก ตามวิธีทดสอบ EN 14103

### 5.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

สำหรับการตรวจวัดคุณสมบัติ ทางเชื้อเพลิงของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบที่ได้ทำการตรวจวัดประกอบไปด้วย ความหนืดจลนศาสตร์ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ การกลั่น คัดน้ำซีเทน และค่าความร้อนเชื้อเพลิง โดยทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบของ

สมาคมการทดสอบและวัสดุประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) ซึ่งผลการตรวจวัดจากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1) ความหนืด (Viscosity)

การตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล และไบโอดีเซล (B100) พบว่า ความหนืดจลนศาสตร์ของ POB100 และ RBB100 สูงกว่าน้ำมันดีเซล 15.52% และ 18.21% ตามลำดับ แต่ COB100 มีค่าความหนืดจลนศาสตร์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 30.13% ในกรณีการตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล และดีเซลผสม (B40) พบว่า ความหนืดจลนศาสตร์ของ POB40 และ RBB40 สูงกว่าดีเซล 10.60% และ 11.00% ตามลำดับ แต่ COB40 มีค่าความหนืดจลนศาสตร์ ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 10.20% และในกรณี การตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของ น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B20) พบว่า POB20 และ RBB20 สูงกว่าดีเซล 3.85% และ 10.15% ตามลำดับ แต่ COB20 มีค่าความหนืดจลนศาสตร์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 3.89%

#### 2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C ของ POB100, RBB100 และ COB100 มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล 4.60%, 4.71% และ 4.21% ตามลำดับ POB40, RBB40 และ COB40 สูงกว่า น้ำมันดีเซล 2.11%, 2.17% และ 1.92% ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของ POB20, RBB20 และ COB20 สูงกว่าน้ำมันดีเซล 1.18%, 1.22% และ 1.06% ตามลำดับ

#### 3) จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟของ POB100, RBB100 และ COB100 สูงกว่าน้ำมันดีเซล 61.47%, 62.83% และ 43.31% ตามลำดับ จุดวาบไฟของ POB40, RBB40 และ COB40 สูงกว่าน้ำมันดีเซล 17.21%, 19.82% และ 10.30% ตามลำดับ และจุดวาบไฟของ POB20, RBB20 และ COB20 สูงกว่า น้ำมันดีเซล 15.24%, 17.6% และ 1.45% ตามลำดับ

#### 4) อุณหภูมิการกลั่นที่ 50% ของตัวอย่างน้ำมัน (Distillation at 50% recovered

อุณหภูมิการกลั่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของ POB100 และ RBB100 มีค่าสูงกว่า น้ำมันดีเซล 16.37% และ 17.84% ตามลำดับ แต่ COB100 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 0.72% POB40 และ RBB40 สูงกว่าน้ำมันดีเซล 8.06% และ 8.89% ตามลำดับ แต่ COB40 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 0.32% และ POB20 และ RBB20 สูงกว่าน้ำมันดีเซล 4.63% และ 5.14% ตามลำดับ แต่ COB20 มีค่า ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 0.17%

#### 5) ดัชนีซีเทน (Cetane Index)

ดัชนีซีเทนของ POB100, RBB100 และ COB100 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 14.27%, 14.47% และ 27.48% ตามลำดับ ดัชนีซีเทนของ COB100 มีค่าต่ำเนื่องมาจาก COB100 มี



อุณหภูมิการกลั่นตัวที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงไบโอดีเซลชนิดอื่น ๆ ประมาณ 17% ค่าดัชนีซีเทนของ POB40, RBB40 และ COB40 ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 4.85%, 4.59% และ 11.31% ตามลำดับ ค่าดัชนีซีเทนของ POB20, RBB20 และ COB20 ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 2.42%, 2.21% และ 6.06% ตามลำดับ

#### 6) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating Value)

ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลจาก RBB100 มีค่ามากที่สุดในกลุ่ม B100 และ COB100 ที่ค่าน้อยที่สุด เนื่องมาจากองค์ประกอบของกรดไขมันที่แตกต่างกัน COB100 มีกรดไขมันที่มีโซ่คาร์บอนที่สั้นกว่าจึงทำให้มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าเนื่องจากกรดไขมันที่มีพันธะสั้นกว่า แต่ก็ทำให้เชื้อเพลิงมีหนืดต่ำกว่าทำให้สามารถสเปรย์เชื้อเพลิงได้ดีกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่หนืดกว่า เช่น POB100 และ RBB100 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าของ POB20, RBB20 และ COB20 ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 3.28%, 3.30% และ 4.33% ตามลำดับ

#### 5.1.3 คุณลักษณะการเผาไหม้

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบต่าง ๆ ประกอบด้วย ความดันในกระบอกสูบ และอัตราการปลดปล่อยความร้อน ซึ่งจากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การเปรียบเทียบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ จากผลทดลองพบว่า ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามโหลดที่เพิ่มขึ้น และมีความดันสูงสุดเพิ่มขึ้น อัตราการปลดปล่อยความร้อน ที่อัตราส่วนการอัด 17 และ 18 การเพิ่มโหลดจาก 25% ถึง 75% พบว่า มีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดมีแนวโน้มสั้นลงตามการเพิ่มโหลดอย่างชัดเจน แต่ในโหลดสูงสุด 100% น้ำมันเชื้อเพลิงหลาย ๆ ชนิดมีแนวโน้มของความล่าช้าในการจุดระเบิดยาวนานกว่าโหลด 75% ที่อัตราส่วนการอัด 16 เมื่อเพิ่มโหลด จาก 50% ถึง 100% ของกลุ่มเชื้อเพลิง B100 และน้ำมันดีเซล กลับมีแนวโน้มความล่าช้าในการจุดระเบิดเพิ่มขึ้น ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อน (Premixed combustion phase) พบว่า อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วง Premixed combustion phase จะมีลักษณะการปลดปล่อยความร้อนที่สูงตามการเพิ่มขึ้นของโหลด 25%, 50% และ 75% ตามปริมาณที่ถูกฉีดเชื้อเพลิงเข้าไป แต่โหลด 100% เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่สัดส่วนที่มากขึ้นทำให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลง จึงมีเชื้อเพลิงในส่วนแรกเริ่มเผาไหม้ไปก่อน ทำให้ที่โหลด 100% จะมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดต่ำกว่าโหลด 75% แต่จะมีระยะเวลาอัตราการปลดปล่อยที่ยาวนานกว่า ส่วนในช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) พบว่า อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วงนี้จะเพิ่มตามโหลด เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเพิ่มเข้าไปตามการเพิ่มขึ้นของโหลดที่โหลดสูงกว่าก็จะมีเชื้อเพลิงเหลือจากการเผาไหม้ในส่วน Premixed

combustion phase มากยิ่งขึ้นจึงทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนมากขึ้นตามโหลดเครื่องยนต์ และช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) อัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงนี้ค่อนข้างน้อย และเมื่อเปรียบเทียบโหลดต่าง ๆ อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วงนี้สูงขึ้นเล็กน้อยตามโหลดที่เพิ่มขึ้น

2) ผลการเปรียบเทียบผลจากการปรับอัตราส่วนการอัดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าลดลงโดยจากการปรับอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 ลดลงเฉลี่ย 13.98% ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้รวมถึงความเข้มข้นของอากาศมากขึ้นเมื่อมีห้องเผาไหม้ที่เล็กลงและมีผลกระทบมากกับเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ช้าเช่น RBB100 ให้มีการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากยิ่งขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงถึง 16.02% เป็นผลกระทบสูงที่สุดในกลุ่ม B100 และ COB 20 เปลี่ยนแปลงสูงสุดในทุกเชื้อเพลิง 19.55% โดยรวมแล้วการเพิ่มอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 ส่งผลกระทบท่อความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมันทุกชนิดอยู่ในช่วงระหว่าง 11.98% ถึง 19.55%

3) ผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของไบโอดีเซล B100 เทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่าเชื้อเพลิง POB100 และ COB100 มีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าสั้นกว่าน้ำมันดีเซล ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล การเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิง RBB100 มีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ยาวนานกว่า ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) มีใกล้เคียงน้ำมันดีเซล การเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) มีค่าใกล้เคียงน้ำมันดีเซล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่แย่กว่าน้ำมันดีเซล

4) การเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของไบโอดีเซล B40 เทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่า เชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 มีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าสั้นกว่าน้ำมันดีเซล ในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) RBB40 และ COB40 มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่มีเพียง POB40 ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลในช่วงนี้

และการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) POB40 RBB40 และ COB40 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล

5) การเปรียบเทียบคุณลักษณะการเผาไหม้ของไบโอดีเซล B20 เทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า เชื้อเพลิง POB20 RBB20 และ COB20 มีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) มีค่าสั้นกว่าน้ำมันดีเซล และในช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) RBB20 และ COB20 มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่ POB20 มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล และช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase) POB20 RBB20 และ COB20 มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่ดีกว่า

#### 5.1.4 สมรรถนะของเครื่องยนต์

##### ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (BSFC)

1) สรุปรูป BSFC มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของโหลด โดยเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนการอัด 16 มีค่า BSFC(kg/kWh) เท่ากับ 0.827, 0.541, 0.456 และ 0.454 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัด 17 มีค่า BSFC(kg/kWh) เท่ากับ 0.796, 0.525, 0.439 และ 0.424 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ และสำหรับอัตราส่วนการอัด 18 ที่เป็นอัตราส่วนการอัดสูงสุด มีค่า BSFC(kg/kWh) เท่ากับ 0.793, 0.518, 0.431 และ 0.403 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ และผลจากการปรับอัตราส่วนการอัดพบว่า ที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BSFC ต่ำกว่าอัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 37.23% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรคได้อย่างมีนัยสำคัญ

2) เมื่อเปรียบเทียบ BSFC ของ B100 กับน้ำมันดีเซลพบว่า B100 ทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 7.47%, 25.04% และ 31.20% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 3.52%, 19.63% และ 22.70% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BSFC ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากขึ้น โดยมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล 6.99% และ 9.79% สำหรับเชื้อเพลิง RBB100 และ COB100 ตามลำดับ แต่สำหรับ POB100 ที่อัตราส่วนการอัด 18 มีค่า BSFC ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 0.61% ซึ่งสังเกตได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยให้เชื้อเพลิง B100 มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและช่วยให้มีการลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของ B100 ให้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากยิ่งขึ้น

3) เมื่อเปรียบเทียบ BSFC ของ B40 กับน้ำมันดีเซลพบว่า B40 ทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ -7.15%, 3.05% และ 0.83% สำหรับเชื้อเพลิง

POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ -8.09%, 0.56% และ 2.18% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BSFC ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 10.94%, 4.94% และ 3.43% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ

4) เมื่อเปรียบเทียบ BSFC ของ B20 กับเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลพบว่า B20 ทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 8.44%, 0.12% และ -2.56% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ มีค่า BSFC ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 14.44%, 5.11% และ 4.39% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BSFC ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 13.16%, 8.36% และ 4.47% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดช่วยให้เชื้อเพลิง B20 มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและช่วยให้มีการลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉพาะเบรกของ B20 ให้ดีกว่าน้ำมันดีเซลมากยิ่งขึ้น

จากการเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉพาะเบรกของเชื้อเพลิงทั้งหมด พบว่าเชื้อเพลิงกลุ่ม B20 และ B40 มีค่า BSFC ที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ถึงแม้จะมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แสดงถึงการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเมื่อมีไบโอดีเซลเป็นส่วนผสม แต่สำหรับ B100 นั้น ยังเป็นเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูง โดยเฉพาะ RBB100 จึงทำให้มีค่า BSFC สูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิง COB100 ที่เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 20.41% จึงทำให้มีค่า BSFC ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล

#### ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE)

1) BTE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของโหลด โดยเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนการอัด 16 มีค่า BTE (%) เท่ากับ 10.40, 15.75, 18.53 และ 18.35 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัด 17 มีค่า BTE (%) เท่ากับ 10.66, 15.99, 19.11 และ 19.94 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ และสำหรับอัตราส่วนการอัด 18 ที่เป็นอัตราส่วนการอัดสูงสุด มีค่า BTE (%) เท่ากับ 10.49, 16.16, 19.49 และ 20.90 ที่โหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ

2) ผลจากการปรับอัตราส่วนการอัดพบว่า ที่อัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันทุกประเภทสูงขึ้นจากเดิมเท่ากับ 2.44%, 1.51%, 3.05%, 7.96% และ 4.07% ที่โหลด 25%, 50%, 75%, 100% และเฉลี่ยทุกโหลด ตามลำดับ และเมื่อทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของน้ำมันทุกประเภทยังคงสูงขึ้นจากเดิมเท่ากับ 0.03%, 1.00%, 1.95%, 4.59% และ 2.24% ที่โหลด 25%, 50%, 75%, 100%

และเฉลี่ยทุกโหลด ตามลำดับ การเพิ่มอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 18 จะพบการเพิ่มขึ้นของ BTE มากสุดในกลุ่มน้ำมัน B100 และสูงสุดในเชื้อเพลิง RBB100 เท่ากับ 33.62% แต่มีการเปลี่ยนน้อยที่สุดในน้ำมันน้ำมันดีเซล 2.32% จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นมีผลกระทบและให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของไบโอดีเซลที่ดีขึ้นและใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากยิ่งขึ้น

3) เมื่อเปรียบเทียบ BTE ของ B100 กับน้ำมันดีเซล พบว่า B100 ที่อัตราส่วนการอัด 16 สูงกว่าน้ำมันดีเซล 6.58%, -8.16% และ -5.18% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัด 17 มีค่าสูงน้ำมันดีเซล 10.98%, -4.00% และ 0.37% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล 15.29%, 7.00% และ 6.74% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ

4) เมื่อเปรียบเทียบ BTE ของ B40 กับน้ำมันดีเซล พบว่า B40 ทั้ง 3 ชนิด มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 16 เท่ากับ 14.07%, 3.60% และ 7.26% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 15.74%, 6.02% และ 6.40% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BTE สูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 21.54%, 12.88% และ 12.44% สำหรับเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ

5) เมื่อเปรียบเทียบ BTE ของ B20 กับน้ำมันดีเซลพบว่า ที่อัตราส่วนการอัด 16 มีค่าสูงกว่า 13.43%, 3.20% และ 1.37% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ มีค่า BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนการอัด 17 เท่ากับ 20.32%, 8.85% และ 9.05% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการอัดสูงสุด 18 มีค่า BTE สูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 23.11%, 13.62% และ 10.04% สำหรับเชื้อเพลิง POB20, RBB20 และ COB20 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเชื้อเพลิงทั้งหมดพบว่า เชื้อเพลิงกลุ่ม B20 และ B40 มีค่า BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล ถึงแม้จะมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แสดงถึงการเผาไหม้ที่ดีขึ้นเมื่อมีไบโอดีเซลเป็นส่วนผสม แต่สำหรับ B100 นั้น ยังเป็นเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงโดยเฉพาะ RBB100 จึงทำให้มีค่า BTE ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิง COB100 ที่เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 20.41% จึงทำให้มีค่า BTE ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล

เมื่อนำมาเรียงจากค่ามากไปน้อยที่อัตราส่วนการอัด 18 จะพบว่าน้ำมันดีเซลผสมทั้งหมดจะมี BTE สูงกว่าน้ำมันดีเซลตามสัดส่วนดังต่อไปนี้ POB20 23.54%, POB40 21.54%,

RBB20 13.62%, RBB40 12.88%, COB40 12.44%, COB20 10.04% จะเห็นเชื้อเพลิง POB20 และ POB40 มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเชื้อเพลิงอื่น ๆ

### 5.1.5 สหสัมพันธ์ของความล่าช้าในการจุดระเบิด

เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบและการทำนายความล่าช้าในการจุดระเบิดพบว่าเชื้อเพลิงหลาย ๆ ชนิดมีค่าความล่าช้าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงควคลาดเคลื่อน 0.22-2.14% หรือคลาดเคลื่อนไปเพียง 0.02-0.34 องศาเพลวข้อเหวี่ยง แต่สำหรับเชื้อเพลิง RBB100 POB100 และ COB40 ค่อนข้างมีความคลาดเคลื่อนสูง 9.40%, 7.40% และ 5.07% หรือ 1.77, 1.1, 0.78 องศาเพลวข้อเหวี่ยง ตามลำดับ เฉลี่ยที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ ซึ่งถือว่าการทำนายความล่าช้าในการจุดระเบิดมีความแม่นยำ โดยเฉลี่ยทุกเชื้อเพลิง 96.95%

### 5.1.6 มลพิษไอเสีย

#### 1) การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>)

การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 13.86, 19.17, -0.36, -2.91, -6.03, -20.54, -6.82, -11.85 และ -18.79 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 15.34, 17.74, 0.77, 2.56, 1.64, -6.11, -3.08, -2.01 และ -4.27 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ -5.38, 2.10, -12.68, -2.32, -7.38, -10.64, -2.75, -7.81 และ -11.71 ตามลำดับ

การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ จากผลการทดสอบพบว่า มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ มีค่าต่ำสุดในช่วงโหลด 25% และ 100% แต่สูงสุดในช่วงโหลด 50% และ 75% ซึ่งการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามโหลด แต่สำหรับโหลด 100% แนวโน้มกลับมีค่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ลดลง เนื่องมาจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นที่โหลดสูง มีอัตราส่วนอากาศต่อน้ำมัน (Air-fuel ratio) ที่ต่ำลงหรือเรียกว่าการผสมแบบหนามากขึ้น (Rich mixtures) ซึ่งทำให้เกิดอัตราการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์นั้นลดลง

ผลการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่อการปรับอัตราส่วนการอัด ซึ่งการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ส่วนมากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) พบว่าการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัด

การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์โดยเฉลี่ยที่ทุกโหลด และเชื้อเพลิงทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะเพิ่มขึ้น 13.11% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะเพิ่มขึ้น 16.33% และเฉลี่ยของการเพิ่มขึ้นทั้งหมดจากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 จะเพิ่มขึ้น 31.72%

ในกลุ่มไบโอดีเซล (B100) เชื้อเพลิง COB100 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล -4.08% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 มีแนวโน้มการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าน้ำมันดีเซล ทั้ง 3 อัตราส่วนการอัด ซึ่ง POB100, RBB100 มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยเฉลี่ยเท่ากับ 7.94%, 13.00% ตามลำดับ การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์น้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซลผสม B40 พบว่า มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเท่ากับ 0.88%, 3.92% และ 12.43% ของเชื้อเพลิง POB40, RBB40 และ COB40 ตามลำดับ และ POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเท่ากับ 4.21%, 7.22% และ 11.58% ตามลำดับ ซึ่งการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ของกลุ่มดีเซลผสมไบโอดีเซลมีแนวโน้มสัมพันธ์กับประสิทธิภาพเชิงความร้อนกลุ่มน้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซล

## 2) การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO)

การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปลดปล่อยมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 18.58, 19.18, 8.25, -3.64, -2.32, -1.72, -4.64, -1.07 และ -2.08 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 19.13, 23.23, 2.38, -2.95, -5.41, -11.93, -9.34, -2.77 และ -8.76 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 13.35, 17.49, -2.91, -6.49, -7.35, -23.37, -10.00, -2.89 และ -20.61 ตามลำดับ

การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ของเชื้อเพลิงทั้งหมดกับโหลดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ จากผลการทดสอบพบว่า การปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ใกล้เคียงกันที่โหลด 25%, 50% และสูงขึ้นเล็กน้อยที่โหลด 75% แต่ที่โหลด 100% มีการปล่อยออกมาสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องมาจากในโหลดสูงสุดเป็นโหลดที่ฉีดเชื้อเพลิงไปสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่สูงมาก ทำให้เกิดการเผาไหม้ในสภาวะอากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงเป็นพิเศษ

ผลของการปรับอัตราส่วนการอัดต่อการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง, ปริมาณออกซิเจน, การผสมกันระหว่าง

อากาศกับเชื้อเพลิง, อุณหภูมิของอากาศ จากผลการทดสอบพบว่า การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด เนื่องจากความร้อนในห้องเผาไหม้สูงขึ้นส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ซึ่งทำให้การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น พบการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยที่สุด สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง COB40 อัตราส่วนการอัด 18 โดยเฉลี่ยทั้ง 4 โหลด มีการปล่อยที่ 917.75 ppm จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการอัด จะทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์โดยเฉลี่ยที่ทุกสภาวะ โหลด และเชื้อเพลิงทุกชนิดมีแนวโน้มลดลง จากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะลดลง 13.59% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะลดลง 12.09% และเฉลี่ยจากการลดลงทั้งหมด จากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 ลดลงทั้งหมด 24%

เมื่อเปรียบเทียบการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล (B100) จากผลการทดสอบพบว่า กลุ่มเชื้อเพลิง ไบโอดีเซล (B100) จะมีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับ 17.02%, 20.68% และ 2.57% สำหรับเชื้อเพลิง POB100, RBB100 และ COB100 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลกระทบของความหนืดของเชื้อเพลิงที่มีต่อคุณภาพของการสเปรย์น้ำมันเชื้อเพลิง และค่าเอนทัลปีของการระเหยกลายเป็นไอของไบโอดีเซล (B100) มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่สำหรับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) มีค่าความหนืดที่ต่ำและมียังประกอบน้ำมันเชื้อเพลิงที่เบากว่าน้ำมันไบโอดีเซล (B100) ชนิดอื่น ๆ จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเชื้อเพลิงไบโอดีเซลชนิดอื่น ๆ แต่ไบโอดีเซลมะพร้าว (COB100) ยังมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าจึงทำให้ที่อัตราส่วนการอัด 16 ที่มีความร้อนและความหนาแน่นของอากาศในห้องเผาไหม้มีค่าต่ำ มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าดีเซล 8.24% ที่อัตราส่วนการอัด 16 และ 2.38% ที่อัตราส่วนการอัด 17 แต่มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 2.91% ที่อัตราส่วนการอัด 18

เมื่อเปรียบเทียบการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ดีเซลกับไบโอดีเซลผสม B40 และ B20 จะมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจะเป็นสัดส่วนเทียบกับน้ำมันดีเซล เฉลี่ยทุกโหลดและทุกอัตราส่วนการอัด โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงที่มีการลดลงมากที่สุด COB40 12.34%, COB20 10.48%, POB20 8.00%, RBB40 5.03%, POB40 4.36% และลดลงน้อยที่สุดสำหรับ RBB40 2.24% ซึ่งโดยทั่วไปน้ำมันไบโอดีเซลนั้นมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เนื่องจากปริมาณโมเลกุลออกซิเจนที่มีอยู่ในไบโอดีเซลจะช่วยในการเผาไหม้

### 3) การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC)

การปล่อยการปล่อยไฮโดรคาร์บอน ที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปลดปล่อยมลพิษ



ไฮโดรคาร์บอน มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 13.14, 13.64, 3.18, -4.83, -1.33, -5.56, -8.57, -2.70 และ -2.70 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยไฮโดรคาร์บอน มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 7.24, 9.23, -1.44, -9.82, -6.02, -11.90, -11.02, -10.16 และ -6.82 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยไฮโดรคาร์บอน มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 4.55, 6.67, -5.88, -6.78, -5.00, -22.33, -12.50, -9.57 และ -16.67 ตามลำดับ

การปล่อยไฮโดรคาร์บอน เปลี่ยนแปลงไปตามโหลดที่แตกต่างกัน พบว่า โหลดที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้มีการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น ตามอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น การปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนจะใกล้เคียงกันที่โหลด 25%, 50% และสูงขึ้นที่โหลด 75% และสูงสุดที่โหลด 100% มีการปล่อยออกมาสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากในโหลดนี้เป็นโหลดที่ฉีดเชื้อเพลิงไปสัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่สูงมาก ทำให้เกิดการเผาไหม้โดยที่อากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ทำให้เกิดการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนสูงเป็นพิเศษเช่นเดียวกับการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เชื้อเพลิงบางชนิดเผาไหม้ได้ช้าและไม่สามารเผาไหม้ได้หมดจึงเกิดการสูญเสียเชื้อเพลิงบางส่วนไปในช่วงการเผาไหม้ช้าเพิ่มขึ้น ที่โหลด 100% มีปลดปล่อยความร้อนในช่วงท้ายเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น CO, HC ฯลฯ)

ผลการปรับอัตราส่วนการอัดตัวต่อการปล่อยไฮโดรคาร์บอนจากผลการทดสอบพบว่า มีการปล่อยไฮโดรคาร์บอนลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด ส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง ความล่าช้าในการจุดระเบิดส่งผลโดยตรงต่อการลดมลพิษ ทำให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่ดีทำให้การปล่อยไฮโดรคาร์บอนลดลง พบการปล่อยไฮโดรคาร์บอนน้อยที่สุด สำหรับน้ำเชื้อเพลิง COB40 อัตราส่วนการอัด 18 โดยเฉลี่ยทั้ง 4 โหลด มีการปล่อย ที่ 25.75 ppm และ การเพิ่มอัตราส่วนการอัด จะทำให้เกิดการปล่อยไฮโดรคาร์บอนโดยเฉลี่ยที่ทุกสภาวะโหลด และเชื้อเพลิงทุกชนิดมีแนวโน้มลดลง จากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะลดลง 11% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะลดลง 13.01% และเฉลี่ยจากการลดลงทั้งหมด จากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 ลดลง 22.56%

เปรียบเทียบการปล่อยไฮโดรคาร์บอนเปรียบเทียบน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล (B100) ได้แก่ POB100, RBB100 และ COB100 จากผลการทดสอบพบว่า COB100 มีการปล่อยไฮโดรคาร์บอนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เท่ากับ 1.38% มีกรดไขมันที่มีไฮโดรคาร์บอนที่สั้นกว่าไบโอดีเซลชนิดอื่น ๆ ซึ่งทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ง่ายและเผาไหม้หมดได้เร็วกว่าเชื้อเพลิง

จากไบโอดีเซลปาล์มและไบโอดีเซลรำข้าว และสำหรับเชื้อเพลิง POB100 และ RBB100 การปล่อยไฮโดรคาร์บอนสูงกว่าน้ำมันดีเซลค่าเท่ากับ 8.31% และ 9.84% ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติความหนืดและความถ่วงจำเพาะที่สูงที่มีผลต่อการเผาไหม้ที่ด้อยกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากปาล์มและรำข้าวมีองค์ประกอบกรดไขมันที่มีคาร์บอนพันธะโซ่ยาวซึ่งกรดไขมันที่มีโซ่ยาวและมีพันธะคู่จะให้การเผาไหม้ที่ยาวนาน จึงทำให้น้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มและรำข้าวมีไฮโดรคาร์บอนหลงเหลือจากการเผาไหม้สูงกว่าน้ำมันดีเซล

เมื่อเปรียบเทียบการปล่อยไฮโดรคาร์บอนเปรียบเทียบน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม B40 และ B20 ได้แก่ เชื้อเพลิง POB40, POB20, RBB40, RBB20, COB40 และ COB20 จากผลการทดลองพบว่า การปล่อยไฮโดรคาร์บอนลดลงเป็นสัดส่วนเทียบกับดีเซลเฉลี่ยทุกโหลดและทุกอัตราส่วนการอัด โดยเชื้อเพลิงที่มีการลดลงมากที่สุด คือ COB40 13.26%, POB20 10.70%, COB20 8.73%, RBB20 7.47%, POB40 6.14% และลดลงน้อยที่สุดสำหรับ RBB40 4.12% ซึ่งเป็นผลกระทบจากการผสมไบโอดีเซลเข้าไปในสัดส่วนที่เหมาะสม เชื้อเพลิงดีเซลผสมมีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นและมีการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้ว (Premixed combustion phase) มีระยะเวลามากขึ้นและทำให้เชื้อเพลิงส่วนในช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase) เผาไหม้ได้มากยิ่งขึ้น ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสมสูงขึ้นตามความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลง จึงทำให้เกิดไฮโดรคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ลดลง

#### 4) การปล่อยควัน (Smoke opacity)

การปล่อยการปล่อยควันที่อัตราส่วนการอัด 16 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยควันลดลงจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 59.32, 52.43, 186.23, 127.42, 117.76, 107.35, 70.91, 42.42 และ 95.83 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 17 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยควัน ลดลงจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 68.32, 71.52, 188.14, 196.51, 110.74, 150.00, 114.89, 109.88 และ 109.88 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการอัดต่าง 18 เชื้อเพลิง POB100, RBB100, COB100, POB40, RBB40, COB40, POB20, RBB20 และ COB20 มีการปล่อยการปล่อยควันลดลงจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 95.12, 114.93, 250.36, 266.41, 118.18, 177.46, 232.18, 163.74 และ 116.22 ตามลำดับ

ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มโหลดปริมาณของควันก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ เนื่องจากมีเชื้อเพลิงมากขึ้นในห้องเผาไหม้แต่ปริมาณอากาศเท่าเดิมทำให้เป็นสัดส่วนผสมแบบหนามากขึ้น ส่งผลให้มีน้ำมันที่หลงเหลือจากการเผาไหม้มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของโหลด

ผลการปรับอัตราส่วนการอัดต่อการปล่อยควัน จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดสูงขึ้นพบว่าการปล่อยควันจะลดลง พบการปล่อยควันน้อยที่สุด สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง POB40 อัตราส่วนการอัด 18 โดยเฉลี่ยทั้ง 4 โหลด มีการปล่อยควันที่ 3.275% การเพิ่มอัตราส่วนการอัด จะทำให้เกิดการปล่อยควันโดยเฉลี่ยที่ทุกโหลดและเชื้อเพลิงทุกชนิด มีแนวโน้มลดลง จากอัตราส่วนการอัด 16 เป็น 17 จะลดลง 19.832% จากอัตราส่วนการอัด 17 เป็น 18 จะลดลง 19.32% และเฉลี่ยจากการลดลงทั้งหมด จากอัตราส่วนการอัดที่ 16 เป็น 18 ลดลง 34.73%

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลและกลุ่มเชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B100) และน้ำมันดีเซลผสมพบว่า ไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลผสม (B40 และ B20) จะปล่อยควันต่ำตํ่ากว่าน้ำมันดีเซลในทุกโหลด โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงที่มีการลดลงมากที่สุด คือ COB100 208.26%, RBB100 79.63%, POB100 74.25% และสำหรับน้ำมันดีเซลผสมมีค่าการปล่อยควันลดลง โดยเริ่มจากน้ำมันดีเซลผสมที่มีการลดลงมากที่สุด คือ POB40 196.78%, COB40 144.94%, POB20 139.33%, RBB40 115.56%, COB20 107.31 และ RBB20 105.35% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ช่วยลดควันได้เป็นอย่างดี

### 5.1.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากการเปรียบเทียบในด้านราคายังพบว่า จากการผลิตเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากปาล์มมีราคาต่ำที่สุดเท่ากับ 31.02 บาท (แพงกว่าน้ำมันดีเซล 37.31%) ซึ่งเชื้อเพลิงไบโอดีเซลนั้นยังคงค่อนข้างมีราคาสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องมาจากการผันผวนของราคาน้ำมันดิบที่ตกต่ำลงในช่วงนี้ และไบโอดีเซลได้ผลิตมาในจำนวนที่ละน้อยส่งผลให้มีราคาค่อนข้างสูงในการผลิต แต่ในด้านการใช้สมรรถนะพบว่า เชื้อเพลิงไบโอดีเซลทั้ง 3 ชนิด ช่วยลดการปล่อยควันได้เป็นอย่างดี และเมื่อนำไปผสมกับเชื้อเพลิงดีเซลในสัดส่วน B20 และ B40 ช่วยในเรื่องยนต์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน การปล่อยมลพิษ CO, HC และควันที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยเฉพาะในกลุ่มเชื้อเพลิง POB100 POB20 และ POB40 ได้ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล 10.95, 16.55% และ 17.41% ตามลำดับ ซึ่งสูงที่สุดในกลุ่มเชื้อเพลิงดีเซลผสม ดังนั้นไบโอดีเซลปาล์ม (POB100) จึงมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด ถึงแม้ในด้านราคาไบโอดีเซลยังค่อนข้างสูง แต่การนำไบโอดีเซลมาใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงดีเซลช่วยให้สามารถลดการปล่อยควันได้เป็นอย่างดี ซึ่งปัจจุบันได้มีปัญหาทางด้านมลภาวะและมีผลกระทบต่อสุขภาพของผู้คนมากมาย ดังนั้นไบโอดีเซลถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้เกิดการจ้างงานที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น เพิ่มมูลค่าผลผลิตทางเกษตรให้กับเกษตรกรและช่วยให้ประเทศไทยพึ่งพาพลังงานภายในประเทศได้มากยิ่งขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่า ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสภาวะความดันบรรยากาศ ควรจะเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้น เนื่องจากในการทดลองบางครั้งมีการเกิดกลีเซอรินหลังจากทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะช่วยทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลในสัดส่วนที่มากขึ้น และช่วยลดปัญหาการเกิดสบู่จากการล้างน้ำมันได้มากขึ้นด้วยเนื่องจากหลงเหลือกรดไขมันลดลง จากการศึกษาการปรับอัตราส่วนการอัดพบว่า ประสิทธิภาพและการปล่อยมลพิษยังคงดีขึ้นต่อเนื่อง โดยอัตราส่วนการอัดสูงสุดที่ทดลองคือ อัตราส่วนการอัด 18 ดังนั้นยังมีความเป็นไปได้ที่จะศึกษาผลกระทบของการปรับอัตราส่วนการอัดที่เพิ่มสูงขึ้นไปจากอัตราส่วนการอัด 18 ประกอบกับอัตราส่วนการอัดที่สูงนั้นส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพและการปล่อยมลพิษที่ดีกับไบโอดีเซล (B100) และดีเซลผสม (B40, B20) ได้มากกว่าของเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไป หากมีการศึกษาใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B100) และเชื้อเพลิงดีเซลผสม (B40, B20) ร่วมกับการเพิ่มอัตราส่วนการอัดที่เพิ่มขึ้นเพื่อจะสามารถทำให้เราเข้าใจและหาจุดสอดคล้องของอัตราส่วนการอัดกับเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันได้อย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น และเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการนำไปใช้งานในเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบในระยะยาวของเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้นร่วมกับการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล (B100) และเชื้อเพลิงดีเซลผสม (B40, B20) ที่มีผลต่อการสึกหรอของอุปกรณ์ต่าง ๆ แตกต่างกับเชื้อเพลิงดีเซลทั่วไปอย่างไร

## รายการอ้างอิง

- กรมธุรกิจพลังงาน. (2556). ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล. กระทรวงพลังงาน
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2556). ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน. กระทรวงพลังงาน
- วรวิฑูรี จุฬาลักษณ์กกุล (2558). เชื้อเพลิงชีวภาพด้วยตัวเร่งชีวภาพ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Agarwal, Deepak, and Avinash Kumar Agarwal. Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. **Applied thermal engineering** 27.13 (2007): 2314-2323.
- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, 33(3), 233-271.
- Bharadwaz, Y. Datta, et al. Improvement of biodiesel methanol blends performance in a variable compression ratio engine using response surface methodology. **Alexandria Engineering Journal**, 55.2 (2016): 1201-1209.
- Bora, B. J. and U. K. Saha (2016). Experimental evaluation of a rice bran biodiesel-biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios. **Renewable Energy**, 87: 782-790.
- Can, Ö., Öztürk, E., & Yücesu, H. S. (2017). Combustion and exhaust emissions of canola biodiesel blends in a single cylinder DI diesel engine. **Renewable Energy**, 109, 73-82.
- Chhabra, Mayank, Ajay Sharma, and Gaurav Dwivedi. Performance evaluation of diesel engine using rice bran biodiesel. **Egyptian Journal of Petroleum**, 26.2 (2017): 511-518.
- D.H. Qi, H. Chen, L.M. Geng, Y.Z.H. Bian. Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends. **Energy Conver Manage**, 51 (2010), pp. 2985-2992

- Demirbas Ayhan. Production of biodiesel fuels from linseed oil using methanol and ethanol in non-catalytic SCF conditions. **Biomass-Bioenergy**, 2009;33(1):113-8.
- Demirbas Ayhan. Studies on cottonseed oil biodiesel prepared in non-catalytic SCF conditions. **Bioresour Technol**, 2008;99(5):1125-30.
- Devan PK, Mahalakshmi NV. Performance, emission and combustion characteristics of poon oil and its diesel blends in a DI diesel engine. **Fuel** 2009; 88:861e7.
- Dubey, P. and R. Gupta (2018). Influences of dual bio-fuel (Jatropha biodiesel and turpentine oil) on single cylinder variable compression ratio diesel engine. **Renewable Energy** 115 : 1294-1302.
- Dueso, Cristina, et al. Performance and emissions of a diesel engine using sunflower biodiesel with a renewable antioxidant additive from bio-oil. **Fuel** 234 (2018): 276-285.
- E, J., Pham, M., Zhao, D., Deng, Y., Le, D., Zuo, W., . . . Zhang, Z. (2017). Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 80, 620-647.
- Hasan, M. M., & Rahman, M. M. (2017). Performance and emission characteristics of biodiesel-diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 74, 938-948.
- John B. Heywood. (1998). **Internal Combustion Engine Fundamentals**. Singapore: McGraw-Hill.
- Kumar Agarwal Avinash. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Prog Energy Combust Sci** 2007;33(3):233-71.
- M.A. Kalam, M. Husnawan, H. Masjuki, Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine, **Renewable Energy** 3 (2003) 2405-2415.
- Madiwale, S., A. Karthikeyan, and V. Bhojwani. Properties investigation and performance analysis of a diesel engine fuelled with Jatropha, Soybean, Palm and Cottonseed biodiesel using Ethanol as an additive. **Materials Today: Proceedings** 5.1 (2018): 657-664.
- Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W., & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 72, 497-509.

- Muralidharan, K., D. Vasudevan, and K. N. Sheeba. Performance, emission and combustion characteristics of biodiesel fuelled variable compression ratio engine. **Energy** 36.8 (2011): 5385-5393.
- Nantha Gopal, K., Pal, A., Sharma, S., Samanchi, C., Sathyanarayanan, K., & Elango, T. (2014). Investigation of emissions and combustion characteristics of a CI engine fueled with waste cooking oil methyl ester and diesel blends. **Alexandria Engineering Journal**, 53(2), 281-287.
- National Center for Biotechnology Information. **PubChem Database**. CID=1 2 1 5 9 6 0 3 1 , <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/121596031> (accessed on May 28, 2020)
- Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan, A., & Sayin, C. (2009). Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. **Fuel**, 88(4), 629-636.
- P. Nakpong, and S. Wootthikanokkhan (2010). High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand, **Renew Energy**, vol.35, pp.1682-1687.
- P.K. Sahoo, L.M. Das, Process optimization for biodiesel production from Jatropha, Karanja and Polanga oils, **Fuel**, 88 (2009), 1588-1594.
- Rakopoulos, C. D., et al. "Comparative performance and emissions study of a direct injection diesel engine using blends of diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins." **Energy conversion and management**, 47.18-19 (2006): 3272-3287.
- Shahid Ejaz M, Jamal Younis. A review of biodiesel as vehicular fuel. **Renew Sustain Energy Rev** 2008; 12(9): 2484-94.
- Sinha, S., et al. (2008). Biodiesel development from rice bran oil: Transesterification process optimization and fuel characterization. **Energy Conversion and Management** 49(5): 1248-1257.
- Sivaramakrishnan, K. "Investigation on performance and emission characteristics of a variable compression multi fuel engine fuelled with Karanja biodiesel-diesel blend." **Egyptian Journal of Petroleum** 27.2 (2018): 177-186.
- Stephen R. Turns. (2012). **An Introduction to Combustion Concepts and Applications (3ed)**, pp. 671. New York: McGraw-Hill.

- Suresh, M., C. P. Jawahar, and Arun Richard. A review on biodiesel production, combustion, performance, and emission characteristics of non-edible oils in variable compression ratio diesel engine using biodiesel and its blends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 92 (2018): 38-49.
- Tamilselvan, P., Nallusamy, N., & Rajkumar, S. (2017). A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 79, 1134-1159.
- Tizard, H. T., and D. R. Pye. "VIII. Experiments on the ignition of gases by sudden compression." **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science** 44.259 (1922): 79-121.
- Tripathi, Shweta, and K. A. Subramanian. Control of fuel spray wall impingement on piston bowl in palm acid oil biodiesel fueled direct injection automotive engine using retarded injection timing, EGR and increased compression ratio. **Applied Thermal Engineering** 142 (2018): 241-254.
- Verma, P., & Sharma, M. P. (2016). Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 62, 1063-1071.
- Wan Ghazali, W. N. M., Mamat, R., Masjuki, H. H., & Najafi, G. (2015). Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 51, 585-602.
- Yli-Jokipii, K. M., et al. (2002). Triacylglycerol molecular weight and to a lesser extent, fatty acid positional distribution, affect chylomicron triacylglycerol composition in women. **J Nutr** 132(5): 924-929.
- Zareh, Parvaneh, Ali Asghar Zare, and Barat Ghobadian. Comparative assessment of performance and emission characteristics of castor, coconut and waste cooking-based biodiesel as fuel in a diesel engine. **Energy** 139 (2017): 883-894.





ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ ชุดที่ 1

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (kg/kgW-hr)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
Diesel	25	0.76	0.76	0.82
	50	0.51	0.52	0.53
	75	0.45	0.44	0.44
	100	0.43	0.42	0.42
POB100	25	0.85	0.80	0.80
	50	0.56	0.53	0.54
	75	0.46	0.44	0.45
	100	0.46	0.45	0.40
POB40	25	0.76	0.75	0.73
	50	0.48	0.48	0.48
	75	0.40	0.40	0.40
	100	0.38	0.36	0.36
POB20	25	0.65	0.62	0.71
	50	0.48	0.46	0.47
	75	0.40	0.37	0.38
	100	0.42	0.37	0.36
RBB100	25	0.92	0.92	0.88
	50	0.61	0.60	0.58
	75	0.54	0.51	0.47
	100	0.60	0.53	0.45

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ ชุดที่ 1 (ต่อ)

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (kg/kgW-hr)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
RBB40	25	0.84	0.81	0.80
	50	0.53	0.51	0.50
	75	0.44	0.44	0.42
	100	0.43	0.41	0.39
RBB20	25	0.79	0.74	0.76
	50	0.51	0.50	0.49
	75	0.43	0.41	0.40
	100	0.43	0.39	0.38
COB100	25	0.89	0.87	0.91
	50	0.60	0.62	0.58
	75	0.55	0.53	0.50
	100	0.66	0.53	0.49
COB40	25	0.79	0.83	0.80
	50	0.53	0.53	0.52
	75	0.44	0.44	0.43
	100	0.42	0.41	0.39
COB20	25	0.84	0.78	0.80
	50	0.52	0.50	0.51
	75	0.44	0.41	0.42
	100	0.43	0.38	0.39

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเครื่องยนต์ ชุดที่ 2

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
Diesel	25	10.15	10.15	9.50
	50	15.20	14.86	14.51
	75	17.34	17.66	17.66
	100	18.08	18.36	18.50
POB100	25	10.45	11.13	11.12
	50	15.98	16.72	16.59
	75	19.42	19.97	19.59
	100	19.21	19.95	21.98
POB40	25	10.87	10.94	11.31
	50	17.09	17.10	17.20
	75	20.59	20.56	20.63
	100	21.34	22.71	23.10
POB20	25	12.28	12.82	11.20
	50	16.75	17.33	17.14
	75	20.19	21.50	20.99
	100	19.19	21.41	22.02
RBB100	25	9.69	9.69	10.07
	50	14.47	14.68	15.43
	75	16.35	17.32	19.08
	100	14.90	16.83	19.91

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ ชุดที่ 2 (ต่อ)

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
RBB40	25	9.78	10.13	10.28
	50	15.64	16.08	16.32
	75	18.80	18.75	19.78
	100	19.30	20.18	21.29
RBB20	25	10.14	10.76	10.54
	50	15.67	16.14	16.41
	75	18.51	19.29	19.78
	100	18.63	20.48	21.24
COB100	25	10.42	10.67	10.27
	50	15.45	15.13	16.00
	75	16.80	17.44	18.60
	100	14.12	17.58	19.11
COB40	25	10.65	10.05	10.47
	50	15.81	15.73	16.05
	75	19.11	19.14	19.60
	100	19.87	20.63	21.29
COB20	25	9.61	10.30	10.09
	50	15.47	16.16	15.90
	75	18.17	19.49	19.23
	100	18.85	21.23	20.52

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความล่าช้าในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ ชุดที่ 3

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ความล่าช้าในการจุดระเบิด (CA)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
Diesel	25	17.46	17.17	15.79
	50	17.59	16.38	15.75
	75	17.66	15.44	15.32
	100	17.72	16.30	14.95
POB100	25	15.27	14.58	13.54
	50	15.48	14.58	13.89
	75	15.76	15.02	13.42
	100	16.57	15.21	14.67
POB40	25	17.19	16.12	14.68
	50	17.37	16.17	14.98
	75	16.42	15.76	14.32
	100	16.46	16.14	15.02
POB20	25	17.86	16.21	15.42
	50	17.53	15.97	14.82
	75	16.88	15.83	14.45
	100	17.75	16.71	15.31
RBB100	25	20.66	19.48	16.80
	50	19.76	18.96	17.48
	75	19.69	19.04	16.41
	100	20.14	18.44	16.69

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ ชุดที่ 3 (ต่อ)

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ความล่าช้าในการจุดระเบิด (CA)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
RBB40	25	17.55	16.88	15.03
	50	16.99	16.59	14.84
	75	16.69	16.18	14.42
	100	16.98	16.85	15.02
RBB20	25	17.58	17.51	14.58
	50	16.97	16.23	14.46
	75	17.05	16.22	14.41
	100	17.51	16.76	14.85
COB100	25	16.68	15.56	15.20
	50	16.10	15.12	14.26
	75	16.37	15.35	14.46
	100	18.16	15.09	13.96
COB40	25	16.46	15.52	14.54
	50	16.00	15.09	14.40
	75	16.19	15.30	14.27
	100	15.89	15.15	14.34
COB20	25	17.70	16.50	14.50
	50	17.69	15.93	14.23
	75	17.89	16.01	14.18
	100	17.55	15.77	14.09



ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวัดมลพิษไอเสีย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางที่ ข.1 ผลการตรวจวัดไนโตรเจนออกไซด์ของเครื่องยนต์ ชุดที่ 1

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ไนโตรเจนออกไซด์ (ppm)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
Diesel	25	307	364	415
	50	348	409	471
	75	329	371	435
	100	299	342	385
POB100	25	367	390	387
	50	425	475	448
	75	398	414	429
	100	298	354	355
POB40	25	263	345	393
	50	354	373	436
	75	332	378	443
	100	297	322	395
POB20	25	275	321	391
	50	321	360	439
	75	326	355	438
	100	279	305	392
RBB100	25	319	339	429
	50	443	442	460
	75	439	480	464
	100	386	419	389

ตารางที่ ข.1 ผลการตรวจวัดไนโตรเจนออกไซด์ของเครื่องยนต์ ชุดที่ 1 (ต่อ)

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ไนโตรเจนออกไซด์(ppm)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
RBB40	25	267	292	332
	50	350	400	427
	75	329	373	420
	100	263	341	409
RBB20	25	257	310	358
	50	323	370	418
	75	307	360	443
	100	260	315	363
COB100	25	276	300	350
	50	360	391	421
	75	363	390	411
	100	279	312	331
COB40	25	254	296	338
	50	285	345	404
	75	301	353	404
	100	223	309	395
COB20	25	259	266	340
	50	295	355	405
	75	287	358	406
	100	238	347	376

ตารางที่ ข.2 ผลการตรวจวัดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเครื่องยนต์ ชุดที่ 2

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	คาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
Diesel	25	969	789	778
	50	827	765	649
	75	957	782	698
	100	2800	2591	2404
POB100	25	1283	1005	827
	50	1104	865	762
	75	1421	1311	1005
	100	3011	2912	2633
POB40	25	970	933	778
	50	846	711	665
	75	887	746	632
	100	2654	2396	2178
POB20	25	1035	966	886
	50	888	718	661
	75	1021	741	584
	100	2362	2081	1986
RBB100	25	1302	1102	845
	50	1098	998	850
	75	1532	1336	1040
	100	3125	2982	2754

ตารางที่ ข.2 ผลการตรวจวัดคาร์บอนมอนอกไซด์ของเครื่องยนต์ ชุดที่ 2 (ต่อ)

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	คาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
RBB40	25	1014	943	789
	50	854	728	654
	75	996	774	614
	100	2562	2229	2162
RBB20	25	1030	964	879
	50	876	708	653
	75	987	722	570
	100	2600	2400	2300
COB100	25	1226	1140	896
	50	1047	695	690
	75	1355	1281	1008
	100	2423	1932	1807
COB40	25	1121	813	747
	50	875	605	547
	75	1000	633	512
	100	2462	2351	1865
COB20	25	978	830	682
	50	965	618	580
	75	932	721	621
	100	2564	2361	1872

ตารางที่ ข.3 ผลการตรวจวัดไฮโดรคาร์บอนของเครื่องยนต์ ชุดที่ 3

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ไฮโดรคาร์บอน (ppm)		
		อัตราส่วนการอัด 16	อัตราส่วนการอัด 17	อัตราส่วนการอัด 18
Diesel	25	26	25	22
	50	30	28	26
	75	38	36	30
	100	58	52	48
POB100	25	27	26	22
	50	34	30	26
	75	46	42	34
	100	68	54	50
POB40	25	26	24	22
	50	28	26	24
	75	36	33	28
	100	55	49	44
POB20	25	25	23	21
	50	27	25	23
	75	35	33	26
	100	53	46	42
RBB100	25	26	25	22
	50	32	30	25
	75	46	45	36
	100	72	55	52

ตารางที่ ข.3 ผลการตรวจวัดไฮโดรคาร์บอนของเครื่องยนต์ ชุดที่ 3 (ต่อ)

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ไฮโดรคาร์บอน (ppm)		
		อัตราการอด 16	อัตราการอด 17	อัตราการอด 18
RBB40	25	24	23	21
	50	29	27	24
	75	37	35	30
	100	60	48	45
RBB20	25	24	22	21
	50	27	26	23
	75	37	34	28
	100	60	46	43
COB100	25	30	27	20
	50	30	28	24
	75	41	37	30
	100	56	47	45
COB40	25	26	21	17
	50	27	25	20
	75	39	34	28
	100	52	46	38
COB20	25	25	23	19
	50	30	27	21
	75	42	34	28
	100	51	48	40

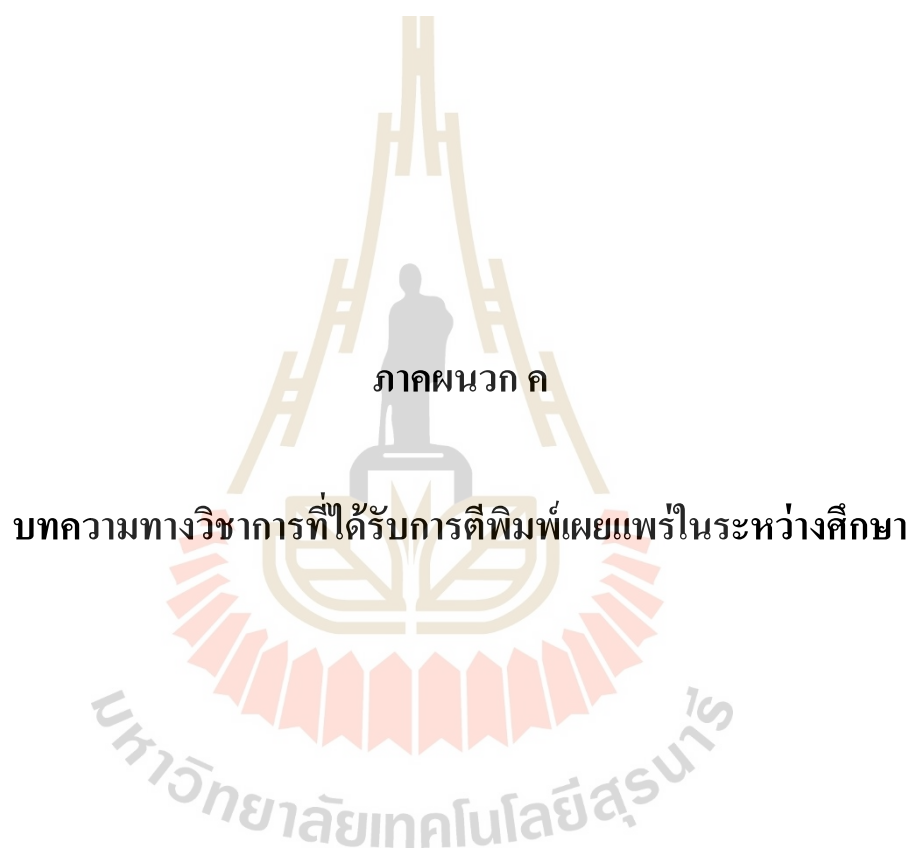
ตารางที่ ข.4 ผลการตรวจวัดควันดำของเครื่องยนต์ ชุดที่ 4

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ควันดำ (%Opacity)		
		อัตราการอด16	อัตราการอด17	อัตราการอด18
Diesel	25	9.7	8.0	7.6
	50	7.6	7.0	6.8
	75	13.9	12.0	11.1
	100	25.2	24.0	22.5
POB100	25	5.0	3.9	3.6
	50	6.0	4.0	3.5
	75	8.0	7.0	5.0
	100	16.4	15.4	12.5
POB40	25	2.5	2.1	1.6
	50	4.0	2.8	1.7
	75	4.3	3.3	2.8
	100	14.0	9.0	7.0
POB20	25	3.0	2.5	2.0
	50	4.0	3.4	2.2
	75	6.0	4.5	2.5
	100	20.0	13.3	7.8
RBB100	25	5.0	4.5	2.4
	50	6.0	4.2	3.3
	75	8.0	5.0	3.6
	100	18.0	16.0	13.0

ตารางที่ ข.4 ผลการตรวจวัดควันดำของเครื่องยนต์ ชุดที่ 4 (ต่อ)

น้ำมัน เชื้อเพลิง ทดสอบ	ภาระกรรม (%)	ควันดำ (%Opacity)		
		อัตราการอด 16	อัตราการอด 17	อัตราการอด 18
RBB40	25	3.0	2.9	2.0
	50	4.1	3.6	3.7
	75	5.8	5.7	5.3
	100	13.0	12.0	11.0
RBB20	25	2.5	2.0	2.5
	50	6.4	5.0	6.4
	75	9.1	5.0	9.1
	100	21.6	12.3	21.6
COB100	25	1.7	1.7	1.6
	50	4.0	3.6	2.9
	75	4.0	3.7	3.0
	100	10.0	8.7	6.2
COB40	25	1.5	1.4	1.3
	50	2.9	2.5	2.7
	75	6.4	4.5	3.3
	100	16.4	12.0	10.0
COB20	25	2.0	2.0	2.3
	50	4.6	4.3	4.7
	75	6.6	7.0	8.0
	100	9.0	11.0	13.8





## บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ยงศธร โคตบุตร, พลรวี วรรณริโก, พรธมา ลิบลับ และการุญ พิงสุวรรณรักษ์, (2561). การลดมลพิษจากเครื่องยนต์อัตราระเบิดโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลปาล์มผสมกับสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 (ENETT 14). โรงแรมโนโวเทล จังหวัดระยอง, 13-15 มิถุนายน 2561.

นิติ กลิ่นแก้ว, ยงศธร โคตบุตร, เอกรงค์ สุขจิต, การุญ พิงสุวรรณรักษ์ และสุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์, (2561). ผลกระทบของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่มีการปรับอัตราส่วนกำลังอัด. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 (ENETT 14). โรงแรมโนโวเทล จังหวัดระยอง, 13-15 มิถุนายน 2561.

ยงศธร โคตบุตร, เมธัส พันธุ์ถ้วน, การุญ พิงสุวรรณรักษ์ และสุริยา พันธุ์โกศล, (2562). ผลกระทบของอัตราส่วนการอัดต่อคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ไบโอดีเซล. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (ENETT 15). ณ เดอะ กรีนเนอรี เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 21-24 พฤษภาคม 2562.

เมธัส พันธุ์ถ้วน, ยงศธร โคตบุตร, การุญ พิงสุวรรณรักษ์ และสุริยา พันธุ์โกศล, (2562). ผลกระทบของการใช้ไบโอดีเซลที่ส่งผลต่อสมรรถนะและสารมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (ENETT 15). ณ เดอะ กรีนเนอรี เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 21-24 พฤษภาคม 2562.

K. Fangsuwannarak, T. Fangsuwannarak, S. Junpirom, P. Wanriko and Y. Khotbut. Emission reduction for high-speed diesel engine using palm oil biodiesel by repeated distillation process. Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, 17-22 June, 2018, Yokohama, Japan

Yongsathon Khotbut, Karoon Fangsuwannarak, Thipwan Fangsuwannarak, Maethas Phantoun and Suriya Phankosol. Effect of a variable compression ratio on the performance and exhaust emission of an agricultural engine using palm biofuel. The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2019), 10-12 July, 2019, Pattaya, Thailand

Karoon Fangsuwannarak, Thipwan Fangsuwannarak, and Yongsathon Khotbut. Effect of nano-TiO<sub>2</sub> additives blended in palm biodiesel on compression ignition engine performance. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2020.Vol. 8, No. 3, p. 20-23



การลดมลพิษจากเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลปาล์มผสมกับสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์  
Exhaust Emission Reduction from Compression Ignition Engine by Using Palm Biodiesel Blended with Nano Zinc Oxide Additive

ยงศธร โคตบุตร<sup>1\*</sup>, พลรวี วรรณวิโก<sup>2</sup>, และ การุญ พิงสุวรรณรักษ์<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ผู้ติดต่อ : E-Mail : karoon@sul.ac.th โทรศัพท์ 098 1387889

บทคัดย่อ

RE-01-108

การปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวภาพมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความสามารถของเชื้อเพลิงชีวภาพให้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้ เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนและช่วยลดการปล่อยมลพิษ โดยการปรับปรุงน้ำมันปาล์มดิบไปเป็นน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (POB100) ด้วยวิธี alkali trans-esterification ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB100) ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยกระบวนการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB100) และ เพิ่มสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (Redistilled POB100+ZnO50) ไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว 4 สูบ น้ำมันทั้ง 3 ชนิดนี้จะใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งน้ำมันทั้ง 4 ชนิดได้ผ่านการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน American Society of Testing and Materials (ASTM) โดยคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นมากกว่าน้ำมันไบโอดีเซล (POB100) แต่ก็ยังด้อยกว่าคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล ในส่วนการทดสอบการปล่อยมลพิษ ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 2,000 และ 3,000 รอบต่อนาที เมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล พบว่า การปล่อยก๊าซ NO<sub>x</sub> เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เช่นเดียวกับ การ CO<sub>2</sub> มีค่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในส่วนของ ก๊าซ CO พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล การกลั่นซ้ำ และการเติมสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ส่งผลให้การปล่อย ก๊าซ CO ยังลดลงแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่ดีขึ้น จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า น้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) และการเพิ่มสารเติมแต่ง ZnO สามารถลดการปล่อยมลพิษได้ จึงเป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่ดีสำหรับอนาคต

**คำหลัก :** ไบโอดีเซล, น้ำมันปาล์มดิบ, การกลั่นซ้ำน้ำมัน, สารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง และการปล่อยมลพิษ

Abstract

Improving biofuels plays an important role in enhancing biofuels' ability to be as close to diesel as possible. It is used as a sustainable alternative energy and reduces emissions. By improving crude palm oil to pure biodiesel palm oil (POB100) by alkali trans-esterification In this study, Biodiesel from refined palm oil (POB100) was improved by redistilled POB100 and added with redistilled nano-zinc additives. POB100 + ZnO50) for use with diesel engines. All four oils have been tested for oil properties under the American Society of Testing and Materials (ASTM). The properties of Redistilled POB are better than biodiesel (POB100), but still inferior to the characteristics of diesel. In the emission test section, Test at a constant engine speed of 2,000 and 3,000 rpm. When biodiesel was compared with diesel, NO<sub>x</sub> emissions were slightly altered. As with CO<sub>2</sub>, there is little change. In CO, it was found to be lower in comparison with diesel, distillation, and addition of ZnO (ZnO) additives, which resulted in a reduction in CO emissions, indicating a better combustion. This study can be concluded. Redistilled POB and the addition of ZnO additives can reduce emissions. It is a great alternative energy for the future.

**Keywords:** Palm biodiesel, fuel property, repeated-distillation, Nanozinc oxide and exhaust emission

1. บทนำ

การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) รวมถึงอนุภาคเล็ก ๆ จากไอเสียของรถยนต์นั้นเป็นสาเหตุหลักของการเกิดมลพิษทางอากาศและยังส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจกขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณน้ำจืดในการนำเชื้อเพลิงทางชีวภาพมาปรับปรุงสำหรับใช้ในเครื่องยนต์แทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลทั่วไป โดยที่ไม่ได้มีการปรับแต่งเครื่องยนต์สำหรับใช้งานเชื้อเพลิงจากชีวภาพแต่อย่างใด น้ำมันปาล์มดิบจึงเป็นอีกเชื้อเพลิงทางชีวภาพที่น่าสนใจนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยปฏิกิริยา Trans esterification นั้น จะใช้แทนแอลกอฮอล์รวมทั้งใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [1] ขณะที่ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบตามมาตรฐานของ ASTM บ่งชี้ว่า น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบเป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล [1,2] อย่างไรก็ตาม โดยปกติแล้วเครื่องยนต์ดีเซลจะมีการปล่อยมลพิษ NO<sub>x</sub> มากกว่าเครื่องยนต์เบนซิน หรือเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟอยู่แล้ว ซึ่งมลพิษ

ที่ปล่อยออกมาเป็นปริมาณมากนั้นจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลถึงการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม เพื่อหาพลังงานทางเลือกอื่นที่สามารถลดการปล่อยมลพิษลง ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากข้อดีมากมาย เช่น เป็นแหล่งพลังงานทางชีวมวลที่อุดมสมบูรณ์และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย รวมถึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล [3,4]

นอกจากนี้ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งเป็นพลังงานทางชีวมวลโดยส่วนใหญ่จะกลายเป็นแหล่งสำหรับลงทุนที่สามารถแข่งขันกับเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เนื่องจากทรัพยากรทางชีวมวลนี้มีอยู่อย่างแพร่หลายทั่วไป [5] อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีการปล่อยมลพิษสูงจะไม่ได้รับอนุญาตสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากไม่ได้มาตรฐานตามระเบียบที่กำหนดไว้โดยกรมธุรกิจพลังงาน การปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบโดยการเพิ่มสารเติมแต่งอินทรีย์จึงเป็นอีกทางเลือก

สำหรับการปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบและลดการปล่อยมลพิษ [6,7]

ในปัจจุบันนี้ สารเติมแต่งอินทรีย์สำหรับเชื้อเพลิงที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมานั้นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น อีเทอร์ (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O และ C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>O เป็นต้น) [8], เอทานอล (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) [9] หรือ กลีเซอรอล (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) [6] อีกทั้งยังมีการสารเติมแต่งในกลุ่มของโลหะ เช่น โทเทเนียม ออกไซด์ [7], อะลูมิเนียม ออกไซด์ [10] แม้กระทั่ง ซิงค์ ออกไซด์ [11] อย่างไรก็ตาม, สารเติมแต่ง nano ZnO ที่เป็น catalysts ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับผลกระทบของสารเติมแต่งที่มีเชื้อเพลิงในการปล่อยไอเสียและคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง. นอกจากนี้กระบวนการกลั่นซ้ำซึ่งสามารถปรับปรุงคุณภาพ POB ได้รับการตรวจสอบเพียงสำหรับการใช้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดการบีบอัด ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานนี้คือการตรวจสอบการปล่อยก๊าซเปรียบเทียบของเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วสูงภายใต้เงื่อนไขเชื้อเพลิงที่ผ่านการทดสอบของบริสุทธิ์ POB (POB100), redistilled POB และ redistilled POB ผสมกับสารเติมแต่ง nano-ZnO เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

ในการศึกษานี้ อิทธิพลของ POB บริสุทธิ์ ที่มีผลต่อปล่อยไอเสียได้รับการศึกษา จากเครื่องยนต์สันดาปภายในคุณสมบัติเชื้อเพลิง POB ของสถานะการผสมน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีลักษณะภายใต้มาตรฐาน ASTM เพื่อที่จะกำหนดชนิดที่มีอยู่ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผ่านการทดสอบและการลดการปล่อยไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วสูงได้รับการทดสอบในประเภทเบนซีนน้ำของ dynamometer การทดสอบทั้งหมดได้รับการดำเนินการโดยไม่มีมีการปรับเปลี่ยนใดๆ ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (น็อกซ์), unburned ไฮโดรคาร์บอน (HC), และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ถูกวัดโดย Testo 350 gas analyzer การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากเครื่องยนต์ถูกวัดโดย Horiba Mexa-584L

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การปล่อยมลพิษจำเพาะ และคราบน้ำมัน

ในการทำงานของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในจะมีการปล่อยไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศออกจากเครื่องยนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบที่ถือว่าเป็นมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ยังไม่เผาไหม้ และสารละออง (Particulate) ความเข้มข้นของแก๊สที่เป็นมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์มักจะถูกวัดเป็นส่วนในล้านส่วน หรือร้อยละในปริมาตร แต่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ อัตราการไหลของมวลมลพิษต่อหน่วยกำลังที่ให้ออกมา เรียกว่า "การปล่อยมลพิษจำเพาะ" อีกลักษณะหนึ่งก็คืออัตราการไหลของมวลมลพิษต่อหน่วยอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่เรียกว่า "คราบน้ำมันการปล่อยมลพิษ"

การเติมสารนาโนซิงค์ออกไซด์ ทำให้อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศลดลง การที่มีออกซิเจนออกไซด์ของ ZnO จะทำให้ความต้องการออกซิเจนลดลงสำหรับกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ZnO ในรูปของของเหลวในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนเกิดจากผลกระทบของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์และการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในน้ำมัน [12] พื้นผิวที่มีผิวของอะตอมจำนวนมากและกระมีตัวของพื้นผิวจำนวนมากช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา

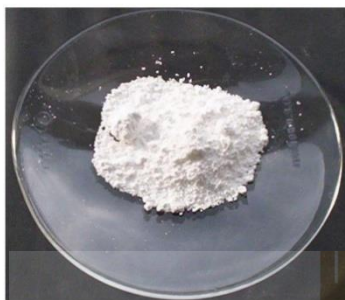
ของน้ำมันและช่วยแบ่งอะตอมของไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิง ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้การเกิดออกซิเดชันของอะตอมของไฮโดรเจนเหล่านี้จะเกิดขึ้นและก่อให้เกิดเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวม

3. วิธีการดำเนินงาน

กระบวนการ Trans-esterification glyceride เป็นกรดไขมันอิสระของสามโมเลกุลรวมกัน, ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่จะตอบสนองกับแอลกอฮอล์ (เมทานอล) กับอัลคาไลน์ (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) เป็นตัวเร่งสำหรับปฏิกิริยา [13, 14]. ในการศึกษากระบวนการ esterification ถูกตั้งขึ้นในขนาดของห้องปฏิบัติการ ผลผลิตผลลัพธ์หลังจากปฏิกิริยาเป็นเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) และกลีเซอรอล ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบของ 400กรัมเป็นสารตั้งต้นที่มีการเพิ่มเมทานอล 20 wt% ของน้ำมันปาล์มดิบและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เกาะ) 1 wt% ของน้ำมันปาล์มดิบทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลาปฏิกิริยา 30 นาที ZnO อนุภาคนาโนสังเคราะห์จาก Nanoscience Technology Thailand ถูกใช้เป็นสารเติมแต่ง อนุภาคนาโน ZnO ที่มีสัดส่วนเล็กน้อยประมาณ 0.005 wt% ของ POB100 (0.05กรัมของนาโน-ซิงค์ออกไซด์ สำหรับลิตรของ POB100 และมวลของ POB100 สำหรับ 1 ลิตรคือ 874.19กรัม) อนุภาค ZnO ถูกผสม homogenously ใน POB โดยที่อุณหภูมิ 50° c โดยวิธีเครื่องผสมสันอัลตราโซนิก เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อที่จะผลิตให้เป็นเนื้อเดียวกัน POB ได้รับการตรวจสอบโดย gas chromatography คุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงที่ผ่านการทดสอบเช่นความหนืด, ความล่องที่จำเพาะ, การกลั่นที่ 50%, คีทิน cetane ถูกวัดตามมาตรฐาน ASTM. แต่ละอย่างวัดซ้ำกัน 3 ครั้ง



รูปที่ 1. กระบวนการ ทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชัน



รูปที่ 2. นาโน ซิงค์ออกไซด์ (Powder)

ในงานวิจัยนี้ จะทำการวัดการปล่อยมลพิษหลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์ ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>), ไฮโดรคาร์บอน (HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยการวัดค่าการปล่อย ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Testo รุ่น 350 ส่วน คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ ไฮโดรคาร์บอน (HC) ใช้เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Horiba รุ่น Mexa 584L โดยวัดการปล่อยมลพิษจากเครื่องยนต์ที่เสถียรที่มีข้อมูลจำเพาะดังที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งวัดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ที่เสถียรที่ความเร็วรอบคงที่ที่ 2,000 รอบต่อนาที และ 3,000 รอบต่อนาที โดยมีภาระกระทำกับเครื่องยนต์ที่ภาระกระทำสูงสุด 80 นิวตัน-เมตร (80 N-m)



รูปที่ 3. (บน) เครื่องสั่นผสม อัดตราโซนิค (ล่าง) ตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

**การปล่อยก๊าซไอเสีย** ยานพาหนะที่แสดงให้เห็นในการทดลองนี้เป็นรถกระบะมาตรฐานที่มี manual gear ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะเครื่องยนต์ที่ระบุไว้ในตารางที่1 วัดค่าการปล่อยไอเสียโดยตรงด้วยการสุ่มตัวอย่างจากท่อไอเสียที่มีโพรบของเครื่องวิเคราะห์ ขณะเดียวกันความสามารถในการวัดสำหรับน็อกซ์ CO และ CO<sub>2</sub> อยู่ในช่วงของ 0-500 ppm, 0-10000 ppm และ 0-50% vol ตามลำดับ ทำการทดสอบซ้ำสามครั้ง ซอฟแวร์ให้

ความสามารถในการจัดการข้อมูลที่พิเศษและความสามารถในการนำเข้า/ส่งออกข้อมูล

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์สำหรับงานวิจัย

Type	FORD XLD 418
Engine Number	D 1870/1 TL
Bore	82.5 mm
Stroke	82.0 mm
Number of Cylinder	4
Swept Volume	1753
Compression Ratio	21.5 to 1
Maximum Power	37 kW at 3600 RPM
Maximum Speed	5000 RPM



รูปที่ 4.1 เครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.2 (ขวามือ) เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Testo รุ่น 350 (ซ้ายมือ) เครื่องมือวัดมลพิษยี่ห้อ Horiba รุ่น Mexa 584L

**4. ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง**

ผลการทดลองพบว่าเชื้อเพลิง POB 84.54% จากนั้นมันปาล์มดิบ 400 กรัมในตารางที่2 ปกติ POB100 มีความหนืดสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล แต่เป็นที่สามารถเห็นได้ในตารางที่ 3, การกลั่นซ้ำของ POB ก่อให้เกิดความหนืดลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ POB100 บริสุทธิ์. อย่างไรก็ตามค่าความหนืดสำหรับการเพิ่ม ZnO ใน redistilled POB. POB100 มีความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย, redistilled POB และ redistilled POB ผสมกับ ZnO additive ของค่าความถ่วงจำเพาะมีคใกล้เคียงกัน ค่าดัชนี Cetane ของทั้งหมดผ่านการทดสอบน้ำมันเชื้อเพลิง POB อยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM แต่ ค่าของดัชนี Cetane เพิ่มขึ้นเล็กน้อย R-POB และ R-POB+ZnO โดย 3% และ 0.4% ตามลำดับเมื่อเทียบกับ POB100 ดูเหมือนว่าจะเป็นที่ประหลาดจากคุณสมบัติทางกายภาพที่ดัชนีของเชื้อ POB ที่ได้ปรับปรุงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล ที่มีความหนืดต่ำทำให้ต่อเครื่องยนต์ความเร็วสูง

Table 2. Result of Palm Biodiesel Yielded

Table 3. Fuel Properties

Type	Viscosity (mm <sup>2</sup> /s) ASTM D445 1.8-4.1	Specific Gravity ASTM D1298 0.81-0.87	Distillation recovere d ASTM D86	Cetane Index ASTM D976 ≥ 45	Heating Value (MJ/kg) ASTM D240
Diesel	3.619	0.810	300.00	67.47	45.424
POB100	8.013	0.875	328.00	47.92	38.592
Redistilled POB (l)	4.912	0.870	330.00	49.44	39.058
l + ZnO 0.005 wt%	4.953	0.875	332.00	48.13	38.420

จากตารางที่ 3 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการกลั่นซ้ำแล้ว (Redistilled POB) จะมีคุณสมบัติที่น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) แต่ยังคงดีกว่าคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล ซึ่งคุณสมบัติด้านความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ (1.8 - 4.1 cSt) และคุณสมบัติด้านความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ (0.81 - 0.87) ขณะที่ค่าดัชนีซีเทนมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว [14] ที่กำหนดไว้คือมากกว่าหรือเท่ากับ 50

4.1 การปลดปล่อยมลพิษ

การวัดมลพิษที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์หลังจากการสันดาปภายในเครื่องยนต์จะทำการวัดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 2,000 รอบ/นาที และ 3,000 รอบ/นาที โดยมีภาระกระทำกับเครื่องยนต์ที่ภาระกระทำสูงสุด 80 นิวตัน-เมตร (80 N-m)

4.1.1 การปลดปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>)

การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 2,000 รอบ/นาที น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) เปรียบเทียบการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) มากกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 1.73 และ 0.06ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นนี้อาจเนื่องมาจาก ความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์ม (POB) สูงกว่าน้ำมันดีเซลมาตรฐาน ถึง 2.21 เท่า จึงเป็นผลทำให้การอัดน้ำมันที่มีความหนืดสูงเป็นละอองฝอยได้น้อยกว่าน้ำมันดีเซล ส่งผลให้การผสมอากาศกับน้ำมันแย่ลง เกิดบริเวณที่ก่อให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) มากยิ่งขึ้น แต่ในส่วนของ (R-POB+ZnO) ปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ลดลง 0.75% และที่ความเร็วรอบคงที่ 3,000 รอบ/นาที น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) และ

น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่นำกลั่นซ้ำ (Redistilled POB)

Experimental Conditions	Testing		
	Case1	Case2	Case3
Crude Palm Oil Quantity (g.)	400.23	400.06	400.12
Methanol Quantity (g.)	80.20	80.01	80.18
KOH Quantity (g.)	4.02	4.08	4.11
Reaction Temperature (°C)	52.00	51.00	51.00
Reaction Time (Min.)	30.00	30.00	30.00
Palm Biodiesel Obtained (g.)	340.90	332.64	341.26
Palm Biodiesel Obtained (mL)	400.12	390.42	400.54
Glycerol Obtained (g.)	49.10	57.44	48.62
Losses (g.)	59.33	67.42	58.86
Palm Biodiesel Yielded (%)	85.18	83.15	85.29
Palm Biodiesel Yielded Average (%)	84.54		

ปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 3.30 และ 2.86 ตามลำดับ ในส่วนของ (R-POB+ZnO)

ปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) เพิ่มขึ้น 1.39% ดังแสดงในกราฟแผนภูมิแท่งในรูปที่ 5.2

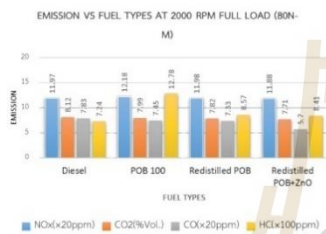
ผลการเติมสารนาซิงค์ออกไซด์ต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) นั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นมาจากนาซิงค์ออกไซด์ ออกซิเจนที่มากขึ้น ก็ช่วยเพิ่มโอกาสในการปล่อย ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) มากขึ้นด้วยเช่นกัน และความหนืดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ผลของการเพิ่มความเร็วยกเครื่องยนต์ ต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่นำกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) และ น้ำมันไบโอดีเซลกลั่นซ้ำซึ่งคอกออกไซด์(R-POB+ZnO) พบว่า มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องมาจากรอบที่สูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการผสมอากาศกับน้ำมันเร็วขึ้นเวลาในการเผาไหม้เร็วขึ้น และอุณหภูมิที่สูงขึ้นของเครื่องยนต์ที่ใช้อุปกรณ์สูงกว่า มักจะมีผลทำให้เกิด ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) มากยิ่งขึ้น

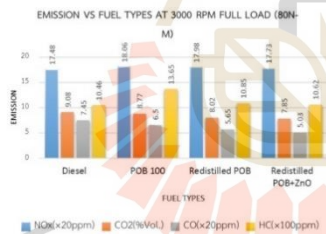
4.1.2 การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 2,000 รอบ/นาที น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB)

และ(R-POB+ZnO)เปรียบเทียบการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลดลงจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 4.76 6.39 และ 27.2 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าน้ำมันไบโอดีเซล (POB)นั้น มีการปลดปล่อยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ลดลง 12.75 % (ที่ 3000 RPM) อาจเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในตัวน้ำมันช่วยทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และเมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลมาผ่านการกลั่นซ้ำ(Redistilled POB)ทำให้มีความหนืดลดลงพบว่าการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลดลงยิ่งขึ้นถึง 24.16 % (ที่ 3000 RPM) และการเติมสารนาโนซิงออกไซด์ลงในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการกลั่นซ้ำก็ช่วยทำให้ลดการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)ได้ถึง 32.48%(ที่ 3000 RPM)



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบการปล่อยไอเสียจากเครื่องยนต์ที่ 2000 rpm



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบการปล่อยไอเสียจากเครื่องยนต์ที่ 3000 rpm

**4.1.3 การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)**

การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 2,000 รอบ/นาที และ3000 รอบ/นาที น้ำมันไบโอดีเซล (POB) และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) (R-POB+ZnO) เปรียบเทียบการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีค่าใกล้เคียงกัน

**4.1.4 การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC)**

การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 2,000 รอบ/นาที น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) และ (R-POB+ZnO) เปรียบเทียบการปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 76.45 18.37 และ16.16 ตามลำดับ ขณะที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 3,000 รอบ/นาที มีการปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) มากขึ้นจากน้ำมันดีเซลร้อยละ 30.56 3.73 และ 1.5 ตามลำดับ ดังแสดงในกราฟแผนภูมิแท่งในรูปที่ 5.2

เนื่องจากน้ำมันน้ำมันไบโอดีเซล(POB)มีค่า Heating Value ที่ต่ำสุด ดังใน Table3. Fuel Properties เพื่อที่จะสร้างกำลังให้ได้เท่ากับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน จำเป็นต้องมีการฉีดน้ำมันในปริมาณที่มากกว่า และความหนืดน้ำมันไบโอดีเซล(POB)ที่มากกว่า 2.21 เท่า รวมทั้งค่า Cetane Index (47.92) ที่ต่ำที่สุด เป็นผลให้การเผาไหม้ไม่หมดมีเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่หลงเหลือจากการเผาไหม้มากกว่าน้ำมันดีเซลมาตรฐาน ร้อยละ 30.56 (ที่ 3000 รอบ/นาที)

**5. สรุปผลการทดลอง**

จากงานวิจัยนี้ ในการวัดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วที่ความเร็วรอบคงที่ ที่ 2,000 รอบ/นาที และ 3,000 รอบ/นาที โดยมีภาระกระทำกับเครื่องยนต์ที่ภาระกระทำสูงสุด 80 นิวตัน-เมตร (80 N-m) จากผลการวัดพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) และน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) นั้น มีการปล่อยมลพิษไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และไฮโดรคาร์บอน (HC) ในปริมาณที่มากขึ้นจากน้ำมันดีเซล ขณะที่มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในปริมาณที่ลดลงจากน้ำมันดีเซล ซึ่งน้ำมันปาล์มดิบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการกลั่นซ้ำ (Redistilled POB) สามารถลดการปล่อยมลพิษได้มากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (POB) และเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง ซิงค์ออกไซด์ (Redistilled POB+ZnO) ในอัตราส่วนที่เล็กน้อย(50ppm) ส่งผลให้มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันที่กลั่นซ้ำเพียงอย่างเดียว(Redistilled POB) จึงเป็นอีกวิธีการพัฒนาพลังงานทางเลือกที่มีความสามารถใกล้เคียงพลังงานหลักยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

**6. กิตติกรรมประกาศ**

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**7. เอกสารอ้างอิง**

[1] N. Alkabbashi, Md Z. Alam, M. E. S. Mirghani and A. M. A. Al Fusaiei, Biodiesel Production from Crude Palm Oil by Transesterification Process. Journal of Applied Sciences 2009;9: 3166-3170.  
 [2] Alamu, O. J., Waheed, M. A., & Jekayinfa, S. O., Biodiesel production from Nigerian palm kernel oil: effect of KOH



- concentration on yield, *Energy for Sustainable Development*, 2007, Vol. 11, No. 3.
- [3] Demirbas, A., *Biodiesel, A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*, Springer-Verlag London limited, 2008.
- [4] Jawad, N., Syed Khaleel, A., & Farrukh, N., Palm Biodiesel an Alternative Green Renewable Energy for the Energy Demands of the Future, *International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT)*, 2008, Vol. 7, pp. 79 - 94.
- [5] Basha, S., & Gopal, K., & Jcbaraj, S., A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance, *Renewable and Sustainable Energy*, 2009, Vol. 13, pp. 1628-1634.
- [6] Chen, K. S., Lin, Y. C., Hsieh, L. T., Lin, L. F., & Wu, C. C., Saving energy and reducing Pollution by use of emulsified palm –biodiesel blends with bio-solution additive, *Energy*, 2011, Vol. 35, pp. 2043 - 2048.
- [7] K. Fangsuwannarak & K. Triratanasirichai., Effect of metalloid compound and bio-solution additives on biodiesel engine performance and exhaust emissions, *American Journal of Applied Sciences* 2013;10 (10):1201-1213.
- [8] D. Hernandez, J. J. Fernandez, F. Mondragon, D. Lopez., Production and utilization performance of a glycerol derived additive for diesel engines, *Fuel* 2012; 92 (1): pp. 130-136.
- [9] E.Weber de Menezes, R. da Silva, R. Cataluña., Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests, *Fuel* 2006; 85 (5-6):815-822.
- [10] T. Shaafi, & R. Velraj, Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: Combustion, engine performance and emissions, *Renewable Energy* 2015; 80: pp. 655-663.
- [11] Karthikeyan S., Elango A. and Prathima A., Performance and Emission Study on Zinc Oxide Nano Particles Addition with Pomolion Stearin Wax Biodiesel of CI Engine, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2014, Vol. 73, pp. 187 - 190.
- [12] T. Shaafi, R. Velraj Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend as additive with diesel-soybean biodiesel blend fuel: combustion, engine performance and emissions *Renew Energy*, 80 (2015), pp. 655-663
- [13] Caye M. D., Nghiem P.N., & Terry H.W., *Biofuel Engineering Process Technology* 1st ed., McGraw-Hill Professional, New York, 2008, pp. 197-200, 202-204.
- [14] J. B. Nduwayezu, T. Ishimwe, A. Niyibizi, & A. Munyentwali, Biodiesel Production from Unrefined Palm Oil on Pilot Plant Scale, *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 2015, Vol. 4, No. 1, pp. 11-21.
- [15] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2556). ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.doeb.go.th/dtanotice/cancel diesel25 01-56.pdf>, เข้าดูเมื่อวันที่ 08/04/2560

### ผลกระทบของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้

#### ของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่มีการปรับอัตราส่วนกำลังอัด

#### Effect of Biodiesel from Used Vegetable Oils on Performance and Combustion characteristics Single-Cylinder Diesel Engine with Variable Compression Ratio

นิติ กลิ่นแก้ว<sup>1</sup>, ยงศธร โคตบุตร<sup>1</sup>, เอกภร สุขจิต<sup>1\*</sup>, กาญญ พิงสุวรรณรักษ์<sup>1</sup> และ แลสุพรรณิ จันทศิริภรณ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\*ผู้ติดต่อ: ekarong@usut.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 0-4422-4770

#### บทคัดย่อ

#### RE-01-155

เชื้อเพลิงชีวภาพมีบทบาทสำคัญในการทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งน้ำมันพืชใช้แล้วถือว่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพประเภทหนึ่งโดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกำลังอัด 16, 17 และ 18 ที่ภาระกรรม 9, 18 และ 27 N-m ตามลำดับ โดยใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วทดสอบเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 RPM ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดส่งผลให้อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าลดลงรวมถึงความล่าช้าในการจุดระเบิดจะสั้นลงที่ภาระกรรมเดียวกัน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัด การเผาไหม้และการปล่อยมลพิษไอเสียพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว (B100) ปล่อยมลพิษไอเสียไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มากกว่าน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม ไนโตรคาร์บอน (HC) และเขม่าควันดำ (Smoke) มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล และการเพิ่มอัตราส่วนการอัดส่งผลให้ CO, HC และ Smoke มีแนวโน้มลดลง แต่ส่งผลให้ NO<sub>x</sub> มีปริมาณเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้การเพิ่มอัตราส่วนการอัดจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และช่วยลดมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์

**คำหลัก:** น้ำมันพืชใช้แล้ว, ไบโอดีเซล, อัตราส่วนกำลังอัด, มลพิษไอเสีย

#### Abstract

Biofuels have an important role in replacing fossil fuel used in diesel engines. Which used vegetable oils is biofuels through trans-esterification. This research was aimed to study the performance, characteristics of combustion and emissions. The engine test was carried out on 1-cylinder, 4-stroke with varying compression ratio (CR) of 16, 17 and 18 at constant speed of 1,500 rpm with varying engine operating loads of 9, 18 and 27 N-m respectively. The experimental results showed that the BSFC decrease as the CR increase and ignition delay period decrease at same load. The BTE increases as increase the CR. The combustion and emission found that NO<sub>x</sub>, CO of used vegetable oils more than diesel fuel. However, HC and smoke less than diesel fuel and increase CR tend to decrease CO, HC and smoke but increase NO<sub>x</sub>. Hence increasing CR alternative for adding combustion efficiency and reduce pollution in compression ignition engine.

**Keywords:** vegetable oils, Biodiesel, Compression ratio, Emission

#### 1. บทนำ

วิกฤติการณ์ด้านพลังงานที่นานาประเทศกำลังเผชิญ หน้าที่อยู่ในปัจจุบัน จากปัญหาการลดลงอย่างรวดเร็วของ ปริมาณเชื้อเพลิงสำรองจากฟอสซิล เนื่องจากการใช้งานในปัจจุบันที่ฐานที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ ทั้งเพื่อการใช้ผลิตไฟฟ้า การคมนาคมขนส่ง ตลอดจนเป็นวัตถุดิบในการผลิตของอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ทำให้ความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้การสำรวจเพื่อหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น การนำเชื้อเพลิงชีวภาพมาปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในเครื่องยนต์แทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลถือว่าเป็น อีกแนวทางหนึ่งที่มีผู้สนใจศึกษากันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น ไบโอดีเซล และไบโอแอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการในการผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถทำได้ด้วยการนำวัตถุดิบ ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ น้ำมันใช้แล้ว และสาหร่ายน้ำมันผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อปรับสภาพให้สามารถนำมาใช้

กับเครื่องยนต์ดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการผลิต ไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในปัจจุบันคือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์จนได้ผลผลิตออกมาเป็นไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงคล้ายน้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ [1-2] เป็นที่ทราบกันดีว่าน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นวัตถุดิบอีกประเภทหนึ่งที่ควรส่งเสริมให้นำไปผลิตไบโอดีเซล ซึ่งนอกจากจะเป็นประโยชน์ด้านพลังงานแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข โดยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ทั่วโลกมีอัตราเฉลี่ยในการบริโภคน้ำมันพืชเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 ต่อปี ส่งผลให้ปัจจุบันมีการบริโภคน้ำมันพืชสูงกว่า 100 ล้านตันต่อปี เพราะวิธีการบริโภคที่หันมานิยมอาหารประเภทงานด่วนที่ปรุงด้วยการทอดมากขึ้น ผลที่ตามมาคือ มีน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวนมากที่เหลือจากการปรุงอาหารซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีจัดการไม่ ว่าเป็นการกำจัด บำบัด หรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข [3] โดยที่เชื้อเพลิงไบโอดีเซลนั้นเป็นหนึ่งใน

พลังงานทางเลือกที่ผู้วิจัยมีความสนใจ เนื่องจากมีข้อดีมากมาย เช่น เป็นแหล่งพลังงานทางชีวภาพที่อุดมสมบูรณ์และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย รวมถึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล [4-5] นอกจากนี้เชื้อเพลิงชีวภาพจะกลายเป็นแหล่งทรัพยากรสำหรับลงทุนที่สามารถแข่งขันกับเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เนื่องจากทรัพยากรทางชีวภาพมีอยู่อย่างแพร่หลาย [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วต่อสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลคู่เดียวที่มีการปรับอัตราส่วนกำลังอัดเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้ อย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

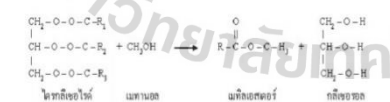
2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) นับเป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่งที่มีผู้สนใจศึกษากันอย่างมาก เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีการพิษ โดยวัตถุดิบในการนำมาผลิตได้มาจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนจากธรรมชาติ อาทิเช่น ปาล์ม สนุ่น ถั่วเหลือง ละหุ่ง และถั่วลิสง เป็นต้น การนำน้ำมันจากพืชและไขมันสัตว์มาเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้เกิดขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2440 โดย รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolph Diesel) ได้คิดค้นประดิษฐ์เครื่องยนต์ดีเซลเป็นครั้งแรกของโลก และทดลองใช้น้ำมันถั่วลิสงกับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งรูดอล์ฟ ดีเซล ได้กล่าวด้วยความเชื่อมั่นว่า "ในอนาคตการใช้ไขมันจากพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจะต้องมีความสำคัญต่อมวลมนุษย์อย่างแน่นอน" เนื่องจากช่วงเวลานั้นมีน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหินในปริมาณที่มากเพียงพอในการใช้เป็นเชื้อเพลิง ไบโอดีเซลจึงไม่เป็นที่สนใจหรือแพร่หลายนัก

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันความสนใจในการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้กลับมาเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจอีกครั้งหนึ่ง และเริ่มมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป โดยวิธีการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันนี้ได้รับความนิยมคือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification Reaction) [7]

2.2 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำมันหรือไขมัน (Triglyceride) กับ แอลกอฮอล์ (เมทานอล/เอทานอล) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา [8] แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 1



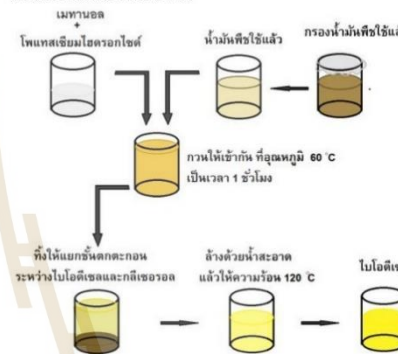
รูปที่ 1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะช่วยให้อัตราเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดได้ดีขึ้น สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้กันในปัจจุบันคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมเมทาอกไซด์ (NaOCH<sub>3</sub>) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโพแทสเซียมเมทาอกไซด์ (KOCH<sub>3</sub>) เป็นต้น

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ดังรูปที่ 2 ดำเนินการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่เป็นเบสคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และใช้เมทานอล (Methanol) เป็นแอลกอฮอล์ที่ใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อคำนวณแล้วจะต้องใช้น้ำมันพืชใช้แล้วปริมาณ 400 กรัม เมทานอลปริมาณ 100 มิลลิลิตร และตัวทำปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 กรัม



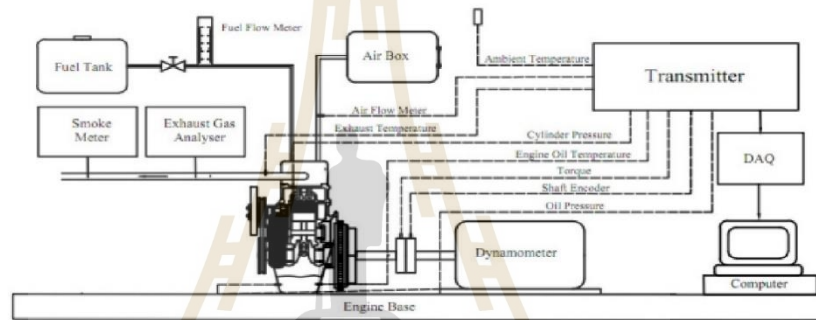
รูปที่ 2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง

งานวิจัยนี้ตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของ ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันดีเซล โดยประเทศไทยนั้นได้กำหนดมาตรฐานสำหรับไบโอดีเซล โดยกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน เพื่อควบคุมคุณภาพของไบโอดีเซลและ ไม่ส่งผลเสียต่อเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งาน มาตรฐานดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ มาตรฐานไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) และมาตรฐาน ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งผลตรวจวัด คุณสมบัติทางเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 1 พบว่า ความตึงจำเพาะ ความหนาแน่น และจุดวาบไฟเป็นไปตามเกณฑ์ที่กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนด แต่ค่าความหนืดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลค่าความหนืด จุดวาบไฟ และความหนาแน่นมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงทดสอบ

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	วิธีทดสอบ	Diesel	B100
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (cSt)	ASTM D445	3.619	6.000
จุดวาบไฟ (°C)	ASTM D93	64	128
ความต้งจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	ASTM D1298	0.830	0.875
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	829	874
ดัชนีซีเทน	ASTM D976	51 [10]	55 [9]
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg)	ASTM D240	44.80 [10]	42.13 [9]



รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องยนต์สำหรับการทดสอบ

3.2 การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่นำมาใช้สำหรับทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซล

Testo รุ่น Testo 308 โดยการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

แสดงดังรูปที่ 3

1 สูบ 4 จังหวะ แบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งแสดง

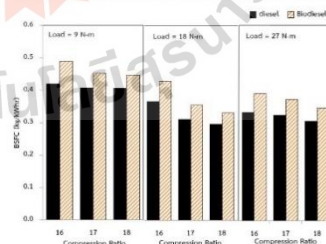
ข้อมูลโดยทั่วไปของเครื่องยนต์ ดังตารางที่ 2

4. ผลการวิจัย

4.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก โดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล แสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

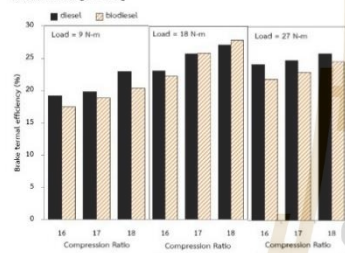
Engine	Specification
Model	TV1
Make	Kirloskar oil engines
Engine type	1 Cylinder, 4 Stroke, Water cooled, Direct injection
Bore	87.5 mm
Stroke	110 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1500 rpm
Compression ratio	12-18
Dynamometer	Eddy current,



รูปที่ 4 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก จากรูปที่ 4 แสดงความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ต่อภาระกรรมพบว่า เมื่อเพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ส่งผลให้

เครื่องมือวิเคราะห์มลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์ใช้ เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 350, ยี่ห้อ Horiba รุ่น MEXA-584L และเครื่องมือวิเคราะห์เขม่าควันดีอีห้อ

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) มีแนวโน้มลดลง และเมื่อเปรียบเทียบที่ภาระกรรมเดียวกันจะพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดจะทำให้ BSFC มีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดทำให้แรงบิดสูงขึ้น [9] ที่ความเร็วรอบเดียวกัน กำลังที่ได้จึงเพิ่มมากขึ้นในปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้เท่ากัน ซึ่งที่ภาระกรรม 27 N-m ไบโอดีเซลมีค่า BSFC สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลประมาณ 17.33%, 14.65%, 13.03% ที่อัตราส่วนกำลังอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ เนื่องจากค่าความร้อนเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลมีค่าน้อยกว่าน้ำมันดีเซล และเพื่อให้ได้กำลังที่เท่ากันไบโอดีเซลจึงต้องใช้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่มากกว่า น้ำมันดีเซล [11-12]



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

จากรูปที่ 5 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกต่อภาระกรรม โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) เป็น ตัวแปรที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยรวม ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล ซึ่งพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดส่งผลให้ BTE เพิ่มขึ้นในทุกๆ ภาระกรรม เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดส่งผลให้มีการเพิ่มความหนาแน่นของอากาศและการผสมระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีขึ้น [16] เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลจะพบว่า BTE ของ ไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลสาเหตุน่าจะมาจากค่า ความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลที่มีค่าสูงกว่าไบโอดีเซล [11-12] รวมถึงค่าความหนืดที่สูงและการระเหยเป็นไอได้ยากของไบโอดีเซลส่งผลให้มีการกระจายตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นไปได้อย่างที่ไม่ดีเท่าที่ควรทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ดี

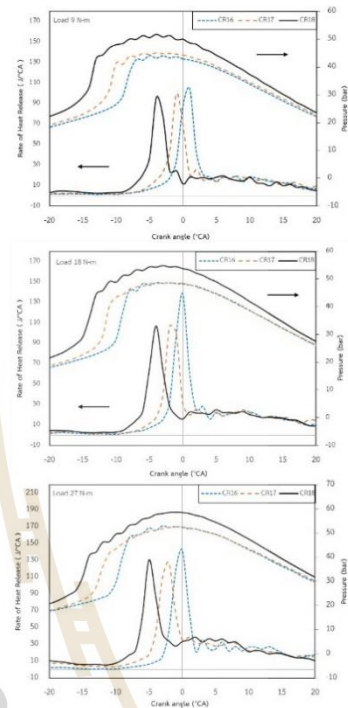
4.2 คุณลักษณะการเผาไหม้

คุณลักษณะการเผาไหม้ที่ได้วิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ได้แก่ ความดันในกระบอกสูบ (in-cylinder pressure) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of heat release) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของกฎข้อที่ 1 เเทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สมมติฐานกระบวนการโพลีโทรปิก (Polytropic process)

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\gamma}{\gamma-1} V \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (1)$$

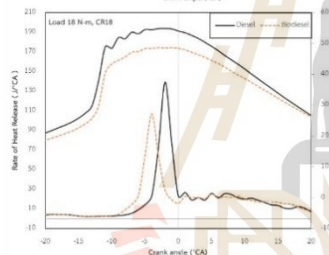
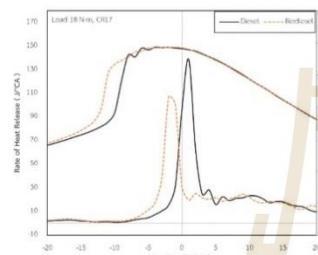
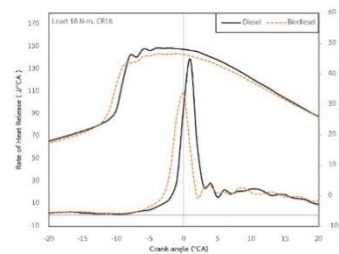
โดยที่  $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$  คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน, (J/ °CA)

- P คือ ความดันในกระบอกสูบ (Bar)
- V คือ ปริมาตรในห้องเผาไหม้ (m<sup>3</sup>)
- θ คือ องศาเฟลาข้อเหวี่ยง (°CA)



รูปที่ 6 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อย ความร้อนของไบโอดีเซล

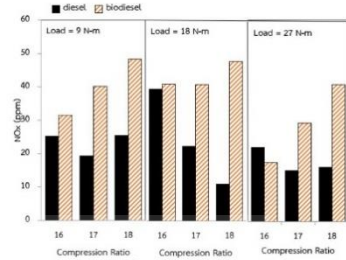
จากรูปที่ 6 แสดงความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของไบโอดีเซล ซึ่งการปรับอัตราส่วนกำลังอัดที่ภาระกรรม 9, 18 และ 27 N-m พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดส่งผลให้เกิดการจุดระเบิดล่วงหน้า (Advance ignition timing) ในการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยมีสาเหตุจากความดันในห้องเผาไหม้ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อากาศภายในห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและความดันของอากาศที่เข้าห้องจะมีความหนาแน่นขึ้นในการจุดระเบิด [13] ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนกำลังอัดที่ 16, 17 และ 18 พบว่า ที่อัตราส่วนกำลังอัดจะก่อให้เกิดอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด เนื่องจากอัตราส่วนกำลังอัดที่ต่ำจะมีความหนาแน่นในการจุดระเบิดที่ต่ำกว่าอัตราส่วนกำลังอัดที่สูง ทำให้มีปริมาณน้ำมันที่รอการเผาไหม้เป็นจำนวนมาก ดังนั้น เมื่อเกิดการจุดระเบิดจึงทำให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนมีค่าสูงกว่า [14]



รูปที่ 7 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อย ความร้อนของไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล

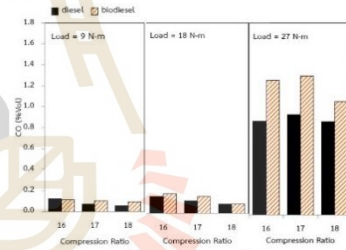
จากรูปที่ 7 แสดงความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนกำลังอัดต่างๆ ไบโอดีเซลเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดล่วงหน้าก่อนเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล โดยการจุดระเบิดจะเกิดขึ้นก่อนที่เชื้อเพลิงจะสิ้นสุดการฉีดส่งผลให้น้ำมันที่ถูกฉีดจะค่อยๆ เผาไหม้ไปจนหมดจึงทำให้ค่าความร้อนไม่สูงมาก เนื่องจากไบโอดีเซลมีค่าซีเทนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล และน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีเลขซีเทนต่ำจะมีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาว เป็นผลให้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ถูกฉีดเข้าไปก่อนเกิดการจุดระเบิด ซึ่งทำให้อัตราการเผาไหม้ในช่วงเริ่มต้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [13]

4.3 มลพิษไอเสีย



รูปที่ 8 ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>)

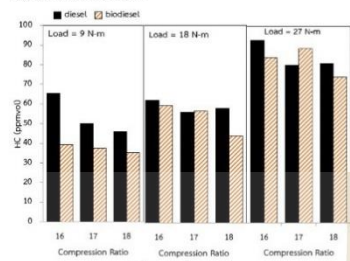
จากรูปที่ 8 แสดงมลพิษไอเสียไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดจะส่งผลให้ NO<sub>x</sub> มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่สูงขึ้น ประกอบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงขึ้น [15] เมื่อพิจารณาระหว่างไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลพบว่า ไบโอดีเซลมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าน้ำมันดีเซล ในทุกๆอัตราส่วนการอัด เนื่องจากออกซิเจนที่อยู่ในโมเลกุลของ ไบโอดีเซลและค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำของไบโอดีเซลจำเป็นต้องฉีดน้ำมันที่มากขึ้น เพื่อให้ได้กำลังเท่ากับน้ำมันดีเซลเมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำให้มีความดันและอุณหภูมิที่สูงซึ่งส่งผลให้ไบโอดีเซลเกิด NO<sub>x</sub> สูงกว่าน้ำมันดีเซล



รูปที่ 9 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

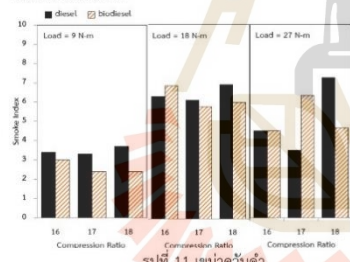
จากรูปที่ 9 แสดงการปลดปล่อยมลพิษไอเสีย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงปริมาณออกซิเจน การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง อุณหภูมิ และการไหลของอากาศแบบปั่นป่วนในห้องเผาไหม้ จากการทดสอบพบว่า การปล่อย CO มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด เนื่องจากประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี ทำให้การปลดปล่อย CO ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ลดลง เมื่อพิจารณา CO ของ ไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่า ที่ภาระกรรม 27 N-m ไบโอดีเซลมีการปลดปล่อย CO ที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 12.83% และ 26.38% ในอัตราส่วนการอัด 17 และ 18 ตามลำดับ ทั้งนี้ที่อัตราส่วนการอัด 18 มีการปล่อย CO ใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปน้ำมันไบโอดีเซลนั้นมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซ CO เนื่องจากโมเลกุลออกซิเจนที่อยู่ใน ไบโอดีเซลจะช่วยให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง [16] แต่เนื่องมาจากไบโอดีเซลที่มีค่าความ

ชนิดที่สูงส่งผลต่อการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นรองได้ยาก การผสมกันระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศจึงไม่เท่ากับน้ำมันดีเซลที่มีความหนืดต่ำกว่า



รูปที่ 10 ไฮโดรคาร์บอน (HC)

จากรูปที่ 10 แสดงการปลดปล่อยมลพิษไอเสียไฮโดรคาร์บอน (HC) โดยไฮโดรคาร์บอนคือ สารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือไม่เกิดการเผาไหม้ จากการทดสอบพบว่า ที่ภาระกรรม 27 N-m ไบโอดีเซลมีการปลดปล่อย HC ลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 18 น้ำมันดีเซลมีค่า HC ที่ต่ำกว่าอัตราส่วนกำลังอัด 16 ประมาณ 12.59% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เมื่อพิจารณาการปลดปล่อย HC ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลพบว่า น้ำมันดีเซลมีค่า HC มากกว่าไบโอดีเซล เนื่องจากโมเลกุลออกซิเจนที่อยู่ในไบโอดีเซลช่วยในการเผาไหม้ทำให้เกิด HC หลงเหลือจากการเผาไหม้น้อยกว่าน้ำมันดีเซล



รูปที่ 11 เขม่าควันดำ

จากรูปที่ 11 แสดงการปลดปล่อยเขม่าควันดำ พบว่าเมื่อเพิ่มภาระกรรมสูงขึ้น ส่งผลให้การปล่อยเขม่าควันดำที่สูงขึ้นเช่นกัน เนื่องมาจากการเพิ่มภาระกรรมของเครื่องยนต์มีการเพิ่มปริมาณน้ำมันในท่อน้ำมันมากขึ้นทำให้ปริมาณเขม่าควันดำเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มภาระกรรมการปล่อยควันดำที่อัตราส่วนการอัดต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดไบโอดีเซลมีแนวโน้มทำให้เขม่าควันดำลดลง เนื่องจากการเผาไหม้ที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการเขม่าควันดำระหว่างน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลพบว่า ที่ภาระกรรม 9 N-m ไบโอดีเซลมีการปล่อยเขม่าควันดำที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

5. สรุปผลการวิจัย

การทดสอบไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว (B100) ต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษไอ

เสียที่ภาระกรรมและอัตราส่วนกำลังต่างๆ สามารถสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

- BSFC มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มภาระกรรมให้กับเครื่องยนต์ และเมื่อเปรียบเทียบที่ภาระกรรมเดียวกันจะพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดจะทำให้ BSFC มีค่าลดลง โดยที่ภาระกรรม 27 N-m ไบโอดีเซลมีค่า BSFC สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลเท่ากับ 17.33%, 14.65%, 13.03% ที่อัตราส่วนกำลังอัด 16, 17 และ 18 ตามลำดับ
- การเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดส่งผลให้ BTE เพิ่มขึ้นในทุกๆภาระกรรม ซึ่งที่ภาระกรรมสูงสุด BTE มีค่าเพิ่มขึ้น 23.02%, 23.87%, 25.23% ที่อัตราส่วนกำลังอัด 16, 17, 18 ตามลำดับและเมื่อเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลพบว่า BTE ของไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล
- การเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดล่วงหน้าก่อน เมื่อเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลพบว่าไบโอดีเซลมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นกว่าดีเซล
- การเพิ่มอัตราส่วนการอัดมีแนวโน้มทำให้ NO<sub>x</sub> มีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันจะส่งผลให้ CO, HC และ เขม่าควันดำลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับ B100 กับน้ำมันดีเซลพบว่า NO<sub>x</sub> และ CO สูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่มีค่า HC และเขม่าควันดำต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยสนับสนุนเครื่องมือการผลิตไบโอดีเซล ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่อาคารเครื่องมือที่เอื้อเฟื้อสถานที่ให้ทำการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Alkabbashi, Md Z. Alam, M. E. S. Mirghani A. M. A. Al-Fusaiel. (2009). Biodiesel Production from Crude Palm Oil by Transesterification Process. Journal of Applied Sciences, vol.9, pp. 3166-3170.

[2] Alamu, O. J., Waheed, M. A., & Jekayinfa, S. O. (2007). Biodiesel production from Nigerian palm kernel oil: effect of KOH concentration on yield, Energy for Sustainable Development, vol.11, No.3.

[3] บริษัท สยามไบโอเอนเนอร์ยี จำกัด (2018). น้ำมันพืชใช้แล้ว (Used Cooking Oil), [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.siambioenergy.com>, เข้าดูเมื่อวันที่ 16/04/2561.

[4] Demirbas, A. (2008), Biodiesel, A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines, Springer-Verlag London limited.

[5] Jawad, N., Syed Khaleel, A., & Farrukh, N. (2008). Palm Biodiesel an Alternative Green Renewable Energy for the Energy Demands of the Future. International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT). vol.7, pp. 79-94.

[6] Basha, S., & Gopal, K., & Jebaraj, S. (2009). A review on biodiesel production, combustion, emissions

and performance, *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 13, pp. 1628–1634.

[7] สมเกียรติ หมายถมกลาง. (2559). การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[8] รุ่งทิพย์ ชัยเดช. (2557). การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อ เนื่องจากน้ำมันทอดใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม-เมทอกไซด์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[9] El\_Kassaby, M. and M. A. Nemit\_allah (2013). Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel/diesel fuel. *Alexandria Engineering Journal* vol.52(1). pp.1-11.

[10] Sivaramakrishnan, K. (2017). Investigation on performance and emission characteristics of a variable compression multi fuel engine fuelled with Karanja biodiesel–diesel blend. *Egyptian Journal of Petroleum*.

[11] Panwar, N.L., et al.(2010). Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. *Applied Thermal Engineering*, 2010. 30(2): pp. 245-249.

[12] สมเกียรติ หมายถมกลาง, เอกกรงค์ สุขจิต, พรรษา ลิ้มลับและวีรชัย อัจฉาญ (2017). การใช้น้ำมันขยะพลาสติกเป็นเชื้อน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13*, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่.

[13] John B. Heywood. (1988). *internal combustion engine fundamentals*, International edition, ISBN: 0-07-100499-8, McGraw-Hill Book, Singapore. pp.539-540.

[14] Hariram, V. and R. Vagesh Shangar. (2015). Influence of compression ratio on combustion and performance characteristics of direct injection compression ignition engine. *Alexandria Engineering Journal*. Vol.54(4), pp. 807-814.

[15] J. Xuea, T. E. Grift, & A. C. Hansena. (2011). Effect of biodiesel on engine performances and emissions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.15, pp.1098–1116.

[16] Pankaj Dubey, Rajesh Gupta. (2016). Study of the performance and emission characteristics for a dual fuel powered single cylinder diesel engine, *Int. Automot. Mech. Eng. (UAME)*. vol.13, pp.3373-3388.



that loaded. 5.4,10.8,16.7 Nm on the compression ratio of 16,17 and biodiesel with smoke is 2 times less than diesel. The effects of Increasing the compression ratio results in a reduced amount of CO, HC, and Smoke but resulting in an increase in NOx. Using biodiesel and increasing the compression ratio is one way to increase combustion efficiency and help reduce exhaust pollution of the engine.

**Keywords:** Palm oil, Biodiesel, Compression ratio, Emissions.

## 1. บทนำ

วิกฤติการณ์ด้านพลังงานที่นานาประเทศกำลังเผชิญหน้าอยู่ในปัจจุบัน จากปัญหาการลดลงอย่างรวดเร็วของปริมาณเชื้อเพลิงสำรองจากฟอสซิล เนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ ทำให้ความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ การสำรวจเพื่อหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น การนำเชื้อเพลิงชีวภาพมาปรับปรุงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงสำหรับในเครื่องยนต์แทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลถือว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีผู้สนใจศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยวิธีการผลิตไบโอดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในปัจจุบันคือ การทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์จนได้ผลผลิตออกมาเป็นไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงคล้ายน้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องดัดแปลงเครื่องยนต์[1]และไบโอดีเซลมีความได้เปรียบเหนือเชื้อเพลิงดีเซลในแง่ของ ออกซิเจน ที่สูงกว่า (ปริมาณออกซิเจน) ซึ่งช่วยลดการเกิดของ HC (ไฮโดรคาร์บอน), CO (คาร์บอนมอนอกไซด์) และการก่อตัวของอนุภาค[2]

อย่างไรก็ตามความหนืดของไบโอดีเซลนั้นสูงกว่าของน้ำมันดีเซลบริสุทธิ์ตามที่นักวิจัยระบุไว้เช่น Benjumea และคณะ [3] ในความเป็นจริงความหนาแน่นและความหนืดที่สูงขึ้นของไบโอดีเซลทำให้เกิดความล่าช้าในการเผาไหม้เชื้อเพลิงมากขึ้นเนื่องจากลักษณะสเปรย์ไม่ดี [4] มีการใช้เทคนิคหลายอย่างเพื่อลดผลกระทบที่เป็นผลเสียจากความหนืดที่สูงขึ้นของไบโอดีเซล การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและสารประกอบของไบโอดีเซลรวมถึงการปรับแต่งเครื่องยนต์ตามคุณสมบัติของไบโอดีเซลนั้น ไบโอดีเซลนั้นมีความร้อนน้อยกว่าดีเซลซึ่งทำให้พลังงานและประสิทธิภาพลดลง [5] สิ่งนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่ม CR Laguitton และคณะ [6] แสดงให้เห็นว่าในในช่วงการเผาไหม้ fully-premixed-charge การลดลงของอัตราส่วนการ

อัด (CR) จะลดอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงสุด ขณะที่ช่วง diffusion combustion กลับจะเกิดขึ้นแทน พวกเขายังแนะนำว่าการลดลงของ CR ให้ผลคล้ายกับช่วงเวลาการฉีดที่ช้าลง (IT) ในทางตรงกันข้ามก็สาารถเพิ่ม CR เพื่อลดความล่าช้าในการจุดระเบิดได้เช่นกัน

ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณปาล์มน้ำมันล้นตลาดส่งผลต่อราคาที่ตกต่ำ ปัญหาต็อกน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ที่มีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น กนป. ระบุ ปี 2561 น้ำมันปาล์มดิบรวม(สำนึกวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร) เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับปาล์มน้ำมัน และเพื่อรองรับปริมาณผลผลิตที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต เชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากปาล์มนั้นเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่ผู้วิจัยมีความสนใจ เนื่องจาก เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่อุดมสมบูรณ์และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย รวมถึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล [7] งานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงความเหมาะสมและประสิทธิภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและผลกระทบของอัตราส่วนการอัด งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง ลักษณะการเผาไหม้การปล่อยมลพิษและสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีการปรับอัตราส่วนกำลังอัดต่าง ๆ โดยใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล(POB)เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล

## 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

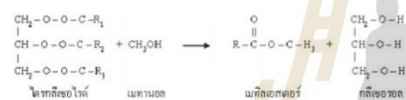
### 2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) นับเป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่งที่มีผู้สนใจศึกษากันอย่างมาก เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีการพิษ โดยวัตถุดิบในการนำมาผลิตได้มาจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนจากธรรมชาติ อาทิเช่น ปาล์ม สบู่ดำ ถั่วเหลือง ละหุ่ง และถั่วลิสง เป็นต้น การนำน้ำมันจากพืชและไขมันสัตว์มาเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันความสนใจในการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้กลับมาเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจอีกครั้งหนึ่ง และเริ่มมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการ

นำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่กำลังจะหมดไปโดยวิธีการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันที่ได้รับความนิยมคือการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Tran-esterification reaction) [1]

**2.2 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน**

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไขมันหรือน้ำมัน (Triglyceride) กับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา[1]รูปปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 1 การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะช่วยทำให้อัตราเกิดปฏิกิริยาเคมีและผลิตภัณฑ์เกิดได้ดีขึ้น สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาคือชนิดเบสที่ใช้กันในปัจจุบันคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมเมทาอกไซด์ (NaOCH<sub>3</sub>) และโพแทสเซียมเมทาอกไซด์ (KOCH<sub>3</sub>)

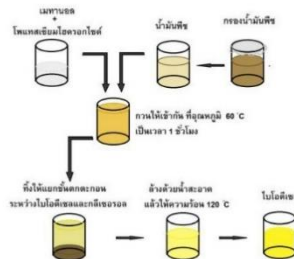


รูปที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

**3. วิธีดำเนินการวิจัย**

**3.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม**

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาทำทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ดังรูปที่ 2 ดำเนินการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือชนิดที่เป็นเบส คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) และใช้เมทานอลแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา โดยมีสัดส่วนเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 โมล ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ผลผลิต 89.47% ของน้ำหนักของน้ำมันปาล์มและจำนวนเมทานอลที่ใช้ และลดความหนืดของน้ำมันปาล์มลงได้ประมาณ10เท่า จาก 54.16 (cSt) เป็น 5.57 (cSt)



รูปที่ 2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช

**3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง**

งานวิจัยนี้ตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันดีเซล โดยประเทศไทยนั้นได้กำหนดมาตรฐานสำหรับไบโอดีเซล โดยกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน เพื่อควบคุมคุณภาพของไบโอดีเซลและไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์เมื่อนำไปใช้งานมาตรฐานดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ มาตรฐานไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) และมาตรฐานไบโอดีเซลสากล ซึ่งผลตรวจวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงดังตารางที่ 1 พบว่า ความถ่วงจำเพาะความหนาแน่น และจุดวาบไฟเป็นไปตามเกณฑ์ที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด แต่ใน ส่วนความหนืดมีค่าความหนืดเท่ากับ 5.57(cSt) ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอยู่ 0.57 (cSt) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลค่าความหนืดจุดวาบไฟและความหนาแน่นมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล

**3.3 การติดตั้งและทดสอบเครื่องยนต์**

เครื่องยนต์ที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ แบบฉีดเชื้อเพลิงตรงเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งแสดงข้อมูลโดยทั่วไปของเครื่องยนต์ ดังตารางที่ 2

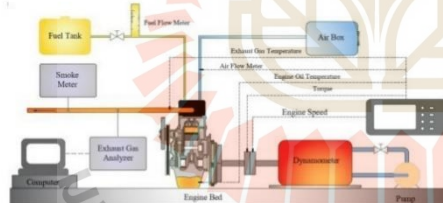
ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิงทดสอบ

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	วิธีการทดสอบ	Diesel	Biodiesel
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (cSt)	ASTM D445	4.12	5.57
จุดวาบไฟ (°C)	ASTM D93	59	154
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6 °C	ASTM D1298	0.830	0.87
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15.6 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	829.253	874.200
ดัชนีซีเทน	ASTM D976	56	50
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (MJ/kg)	ASTM D240	46.48	40.54

ตารางที่ 2 ข้อมูลเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ

Engine Specification	
Model	TV1
Make	Kirloskar Oil engines
Engine type	1 cylinder, 4 stroke, Water cooled, Direct injection
Bore	87.5 mm
Stroke	110 mm
Connecting rod length	234 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1500 rpm
Compression ratio	12-18
Dynamometer	Eddy current, Water cooled

เครื่องมือวิเคราะห์มลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์ใช้ เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 350, ยี่ห้อ Horiba รุ่น MEXA-584L และเครื่องมือวิเคราะห์เขม่า ยี่ห้อ WAGER รุ่น DIGITAL SMOKE METER MODEL 6500 โดยการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองแสดงไว้ในแผนภูมิ รูปที่ 3 โดยมีการทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ 1500 รอบต่อนาที ภายภาระกรรม 5.4,10.8,16.3,21.7 N-m หรือ 3.6,9,12 kg และปรับค่าอัตราส่วนกำลังอัดที่ 16, 17, 18 ตามลำดับ โดยใช้ น้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล ทำการวัดค่าคุณลักษณะการเผาไหม้, สมรรถนะเครื่องยนต์, และมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการติดตั้งเครื่องยนต์สำหรับการทดสอบ

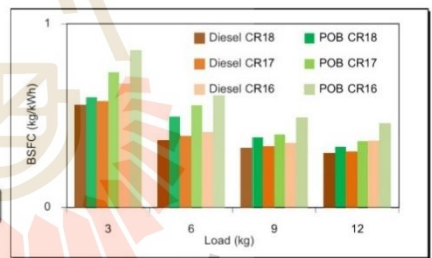
4. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์

ผลการทดสอบด้านสมรรถนะเครื่องยนต์ได้แก่ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย โดยใช้ไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับผลของการทดสอบกับน้ำมันดีเซลซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอ้างอิง ซึ่งแสดงผลทดสอบ ดังต่อไปนี้

4.1.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC)

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption, bsfc) คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวลต่อกำลังหนึ่งหน่วยที่ผลิตได้จากเครื่องยนต์ภายในระยะเวลาหนึ่งหน่วย จากรูปที่ 4 แสดงความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก(BSFC) ไบโอดีเซลมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงกว่าดีเซลในทุกภาระโหลด เนื่องจากค่าความร้อนของไบโอดีเซลมีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนของดีเซลเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนที่เท่ากันไบโอดีเซลจึงต้องใช้ปริมาณน้ำมันที่มากกว่าดีเซล และเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนการอัดค่า BSFC ของไบโอดีเซลมีค่าเข้าใกล้ดีเซลมากยิ่งขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง(ดังในรูปที่6) ซึ่งช่วยลดข้อด้อยของน้ำมันไบโอดีเซลที่มีความหนืดสูงกว่าและค่า Cetane index ต่ำกว่าดีเซล ดังในตารางที่ 1 การเพิ่มอัตราส่วนอัดในส่วนนี้จะเป็นการทำให้ น้ำมันไบโอดีเซลเผาไหม้ได้หมดจดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากขึ้น[8]

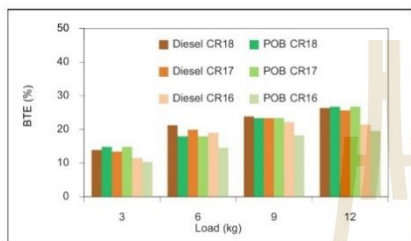


รูปที่ 4 ความสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะเบรกต่อภาระกรรม

4.1.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก(BTE)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency, BTE) คือ ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล จาก รูปที่ 5 พบว่า ไบโอดีเซลมีค่า BTE ใกล้เคียงกับดีเซล แต่ในการทดสอบที่ อัตราส่วนการอัด16 ไบโอดีเซลมีค่า BTE ต่ำกว่าดีเซล ซึ่งที่อัตราส่วนการอัด16 มีการอัดตัวของอากาศ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ต่ำลง ซึ่งค่าซีเทนของไบโอดีเซลที่ต่ำกว่าส่งผลทำให้มีการเผาไหม้ที่ไม่ต่อเนื่อง และความ

ชนิดที่ทำให้สเปรย์เชื้อเพลิงที่แยกอาจเกิดการกระจุกตัวของน้ำมันไบโอดีเซลสังเกตได้จาก รูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าความดันในกระบอกสูบของไบโอดีเซลจะไม่ราบเรียบนัก และอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ไม่ต่อเนื่องเมื่อเทียบกับดีเซล โดยรวมการเพิ่มอัตราส่วนการอัดส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกๆ โหลด



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคต่อภาระกรรม

#### 4.2 คุณลักษณะการเผาไหม้

คุณลักษณะการเผาไหม้ที่ทำการตรวจสอบได้แก่ ความดันในกระบอกสูบ (In cylinder pressure) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of heat release) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (1) โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของกฎข้อที่ 1 เทอร์โมไดนามิกส์ภายใต้สมมติฐานกระบวนการโพลีโทรป (Polytropic process) แสดงดังสมการที่ 1

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (1)$$

โดยที่  $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$  คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน, (J/ °CA)

P คือ ความดันในกระบอกสูบ, (Bar)

V คือ ปริมาตรในห้องเผาไหม้, ( $m^3$ )

$\theta$  คือ องศาเพลลาข้อเหวี่ยง, (°CA)

$\gamma$  คือ อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ

##### 4.2.1 ความดันในกระบอกสูบ

รูปที่ 6 แสดงความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนต่อองศาเพลลาข้อเหวี่ยง ของน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด การปรับอัตราส่วนกำลังอัดสำหรับการทดสอบที่ภาระกรรม 12 kg พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัดที่ภาระ

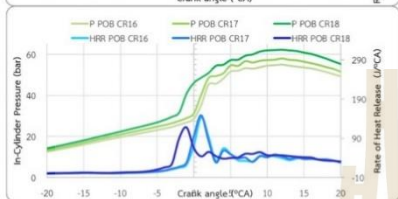
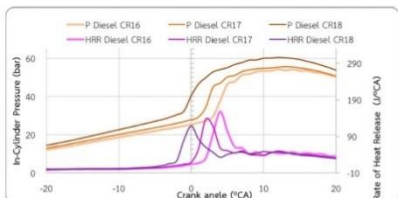
กรรมเดียวกันจะเกิดการจุดระเบิดล่วงหน้า (Advance ignition timing) มากขึ้น แสดงถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเร็วขึ้น หรือมีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่สั้นลง เป็นไปตามรูปที่ 6 เนื่องจากอุณหภูมิและความดันของอากาศมีผลต่อสภาวะของสารผสม[9] ทำให้เริ่มการเผาไหม้ได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความดันในกระบอกสูบของไบโอดีเซลกับดีเซลที่โหลด 12Kg ทั้ง 3 อัตราส่วนการอัด(16,17,18) จากรูปที่ 7 พบว่าไบโอดีเซลมีช่วงความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นกว่า สังเกตได้จากการเพิ่มความดันที่เกิดขึ้นในองศาเพลลาข้อเหวี่ยงที่น้อยกว่าจากจุดศูนย์ตายบน อาจเนื่องมาจากน้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลตั้งในรูปที่ 1 และมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้มากกว่าจึงเป็นผลให้เกิดการเริ่มการเผาไหม้ได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล

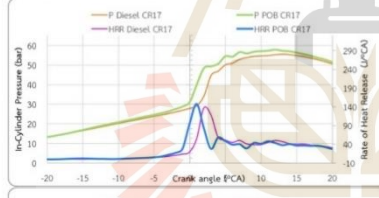
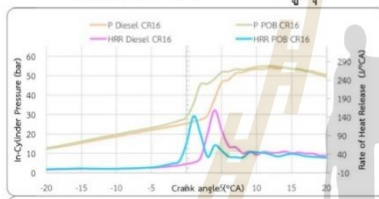
##### 4.2.2 อัตราการปลดปล่อยความร้อน

ในส่วนของอัตราการปลดปล่อยความร้อนเมื่อเปรียบเทียบการปรับอัตราส่วนการอัดพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการอัดส่งผลให้ อัตราการปลดปล่อยความร้อนเกิดขึ้นเร็วกว่าหรือมีความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) สั้นลง และมีช่วงการเพิ่มอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ต่อเนื่องกว่า มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดลดลง อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนการอัดที่สูง ห้องเผาไหม้มีความร้อนสูงทำให้น้ำมัน เชื้อเพลิงมีอัตราการระเหยเป็นไอได้ดี [11] ทำให้เชื้อเพลิงสามารถเกิดการเผาไหม้กระจายตัวได้ดีกว่าเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องสังเกตได้จากรูปที่ 6 กราฟความดัน ที่อัตราส่วนการอัดที่ 18 จะมีความราบเรียบกว่าอัตราส่วนการอัด 17 และ 16

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด จากรูปที่ 7 พบว่า ไบโอดีเซลมีความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นกว่าเล็กน้อย ในทั้ง 3 อัตราส่วนการอัด แต่ ไบโอดีเซลมีการเผาไหม้ได้ไม่ราบเรียบนักเมื่อเทียบกับดีเซล อาจเนื่องมาจากมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่และดัชนีซีเทนที่ต่ำกว่า



รูปที่ 7 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มอัตราส่วนการอัดของไบโอดีเซลและดีเซลที่โหลดสูงสุด



รูปที่ 8 ความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนการอัดต่างๆที่โหลดสูงสุด

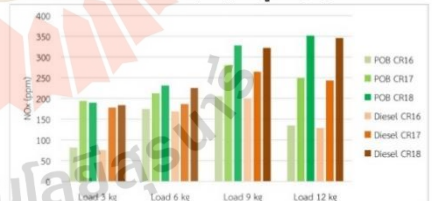
### 4.3 การปลดปล่อยมลพิษ

#### 4.3.1 ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>)

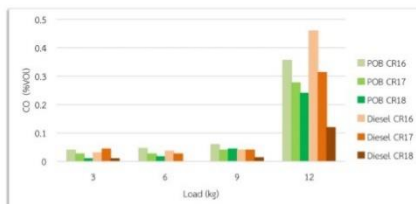
ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) มีองค์ประกอบหลักๆ โดยประกอบด้วยไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของออกซิเจนและไนโตรเจนที่มีอยู่ในอากาศ ซึ่งมักจะรวมตัวกันเมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูง ทำให้ไนโตรเจนสามารถสร้างพันธะกับออกซิเจนได้ รวมทั้งองค์ประกอบออกซิเจนและไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับดีเซล จากรูปที่ 8 พบว่าไบโอดีเซลมีการปล่อย ไนโตรเจนออกไซด์(NO<sub>x</sub>)สูงกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อยในทุกๆอัตราส่วนการอัดเนื่องจากผลของออกซิเจนที่มีอยู่ในไบโอดีเซลช่วยให้มีปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในอากาศในห้องเผาไหม้มากยิ่งขึ้นส่งผลให้มีโอกาสเกิดไนโตรเจนออกไซด์(NO<sub>x</sub>)สูงขึ้น รวมทั้งความหนืดที่สูงของน้ำมันไบโอดีเซล ดังในตารางที่ 1 การฉีดน้ำมันจึงเป็นผลของที่ยากกว่าดีเซลและจุดวาบไฟที่สูงเป็นผลทำให้มีบริเวณอากาศบางส่วนที่ไม่ได้เผาไหม้เกิดการรวมตัวของไนโตรเจนออกไซด์(NO<sub>x</sub>) ส่งผลให้ไบโอดีเซลมีไนโตรเจนออกไซด์(NO<sub>x</sub>) ที่สูงกว่าดีเซล

เมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มอัตราส่วนการอัด จากรูปที่ 8 พบว่าการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัด ทำให้ห้องเผาไหม้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงก่อให้เกิดโอกาสการรวมตัวกันของออกซิเจนและไนโตรเจนที่มีอยู่ในอากาศมากยิ่งขึ้น การปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) จึงสูงขึ้น[12]



รูปที่ 8 ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่ภาระกรรมต่างๆ



รูปที่ 9 การปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ภาระกรรมต่างๆ

4.3.2 คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

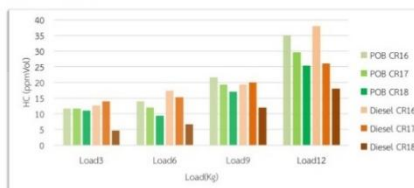
คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ที่ถือว่าเป็นมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งหลักๆ แล้วเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ไม่เพียงพอและเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศได้ไม่ดี การเปรียบเทียบการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ของไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลพบว่าไบโอดีเซลมีการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ต่ำกว่าดีเซล 22.46% ,11.7% ที่อัตราส่วนการอัด 16,17 ที่ภาระกรรม 12 kg

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด พบว่าการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลง อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนการอัดที่สูง ห้องเผาไหม้มีความร้อนสูงทำให้น้ำมัน เชื้อเพลิงมีอัตราการระเหยเป็นไอได้ดี [11] ทำให้เชื้อเพลิงผสมกับอากาศได้ดีสามารถเกิดการเผาไหม้กระจายตัวได้ดีขึ้นเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องสังเกตได้จากรูปที่ 6 กราฟความดัน ที่อัตราส่วนการอัดที่ 18 จะมีความราบเรียบกว่าอัตราส่วนการอัด16,17

4.3.4 ไฮโดรคาร์บอน (HC)

ไฮโดรคาร์บอน(HC)คือสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือไม่เกิดการเผาไหม้ จากรูปที่ 10 เปรียบเทียบการปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ภาระกรรมต่างๆพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัด16 เป็น 18 ที่ภาระโหลด 12kg ส่งผลให้การปล่อย HCลดลง 27.6% สำหรับเชื้อเพลิงไบโอดีเซล และลดลง 52.6% สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งการลดลงของ HCแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัด ทำให้ความร้อนในห้องเผาไหม้ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง[9] (ดังในรูปที่ 6) ความล่าช้าในการจุดระเบิดส่งผลโดยตรงต่อการลดมลพิษ HC[12]มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบการปล่อย HC ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล จากรูปที่ 10 พบว่าในช่วงโหลด 12 kg ไบโอดีเซล

มีการปล่อย HC สูงกว่าดีเซล,12%,28.9% ที่อัตราส่วนการอัด 17,18 ตามลำดับ ด้วยความหนืดที่สูงกว่าของน้ำมันไบโอดีเซลตั้งในตารางที่1 และด้วยปริมาณเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่ต้องฉีดมากกว่า ทำให้การสเปรย์ของน้ำมันยิ่งแยขึ้นสังเกตได้จากในช่วงโหลดต่ำเชื้อเพลิงไบโอดีเซลนั้นมีการปลดปล่อย HC ที่ค่อนข้างต่ำกว่าดีเซล

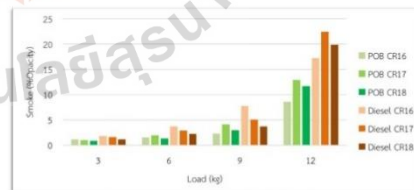


รูปที่ 10 การปล่อยไฮโดรคาร์บอนที่ภาระกรรมต่างๆ

4.3.5 ควันดำ (Smoke)

การปล่อยควันสามารถเกิดจากเขม่าคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้สารระเหยรวมทั้งการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมัน จากรูปที่ 11 แสดงถึงการปล่อยควันเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนกำลังอัด เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดสูงขึ้นพบว่าการปล่อยควันจะลดลง ในส่วนของการปรับโหลดพบว่าเมื่อเพิ่มโหลดปริมาณของควันก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ เนื่องจากมีเชื้อเพลิงมากขึ้นในห้องเผาไหม้แต่ปริมาณอากาศเท่าเดิมทำให้เป็นสัดส่วนผสมแบบหนามากขึ้น ส่งผลให้มีน้ำมันที่หลงเหลือจากการเผาไหม้มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของโหลด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลจะพบว่าไบโอดีเซลจะปล่อยควันต่ำกว่าดีเซลเกือบเท่าตัวที่โหลดสูงสุด 12 kg อาจเนื่องมาจากไบโอดีเซลมีโมเลกุลออกซิเจนช่วยและมีองค์ประกอบสารคาร์บอนรวมถึงธาตุผสมอื่นที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดีเซล



รูปที่ 11 การปล่อยควันที่ภาระกรรมต่างๆ

## 5. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวัดคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง และการทดสอบน้ำมันไบโอดีเซลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ การเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษเทียบกับน้ำมันดีเซล โดยทดสอบที่ภาระกรรมต่างๆ สามารถสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

-คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซล(POB) มีค่าความหนืด, ความหนาแน่น, ความถ่วงจำเพาะ, จุดวาบไฟ สูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่ดัชนีซีเทน และค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

-ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) ของไบโอดีเซล (POB) มีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลในทุกภาระกรรม และทุกอัตราส่วนการอัด เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดอัตราส่วนเปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิงจะลดลงในทุกๆภาระโหลด

-ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของ ไบโอดีเซล (POB) มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลในภาระโหลด 3 และ 12 kg

-เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลง

-จากผลการวัดการปล่อยไอเสียพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการอัดส่งผลให้มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) และควัน(Smoke) ลดลง ส่วนออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) เพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนการอัดส่งเสริมให้น้ำมันไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่คอยสนับสนุนเครื่องมือการผลิตไบโอดีเซลของขอขอบคุณผู้เครื่องมือที่สนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบค่าคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่อาคารเครื่องมือที่เอื้อเฟื้อสถานที่ให้ทำการทดสอบ

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Alkabbashi, Md Z. Alam, M. E. S. Mirghani A. M. A. Al-Fusaiel. (2009). Biodiesel Production from Crude Palm Oil by Transesterification Process. *Journal of Applied Sciences*, vol.9, pp. 3166-3170.
- [2] J. Xue, T.E. Grift, A.C. Hansen, Effect of biodiesel on engine performances and emissions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2) (2011) 1098e1116.

[3] P. Benjumea, J. Agudelo, A. Agudelo, Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends, *Fuel* 87 (10–11) (2008) 2069–2075.

[4] K. Subramanian, Utilization of biodiesel in compression ignition engines, *Biorefining of Biomass to Biofuels* (2018) 153–165

[5] Jindal S, Nandwana BP, Rathore NS, Vashistha V. Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on *Jatropha methyl ester*. *Appl Therm Eng* 2010;30(5): 442–8.

[6] Laguiton O, Crua C, Cowell T, Heikal MR, Gold MR. The effect of compression ratio on exhaust emissions from a PCCI diesel engine. *Energy Convers Manage* 2007;48(11):2918–24.

[7] Jawad, N., Syed Khaleel, A., & Farrukh, N. (2008). Palm Biodiesel an Alternative Green Renewable Energy for the Energy Demands of the Future. *International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT)*. vol.7, pp. 79-94.

[8] El Kassaby, M. and M. A. Nemit\_allah (2013). Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel/diesel fuel. *Alexandria Engineering Journal* vol.52(1). pp.1-11.

[9] TIZARD and PYE, *Philosophical Magazine*, July 1922.

[10] John B. Heywood. (1988). *internal combustion engine fundamentals*, International edition, ISBN: 0-07-100499-8, McGraw-Hill Book, Singapore. pp.539-540.

[11] Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. *Waste Manage*, vol. 51, pp. 91-96.

[12] Bora, B. J. and U. K. Saha (2016). "Experimental evaluation of a rice bran biodiesel–biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios." *Renewable Energy* 87: 782-790.

## EMP-xx

## ผลกระทบของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ส่งผลต่อสมรรถนะและสารมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์

## Effect of using biodiesel on the performance and emissions of the engine exhaust

เมฆัส พันธุ์ชวน<sup>1</sup> ยงศธร โคตรบุตร<sup>1</sup> การุญ พังสุวรรณรักษ์<sup>1</sup> และ สุรียา พันธุ์โกศล<sup>2</sup><sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี<sup>2</sup> สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

\*ติดต่อ: Karoon@sut.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 044 224 311

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่างๆจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบขนาด 1753 ซี.ซี ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 รอบต่อนาที ที่ภาระโหลด 30, 50, 70 N-m โดยใช้น้ำมันดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลเพียง 2 ชนิด คือน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าว โดยอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของน้ำมันดีเซลมีค่าที่น้อยกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว และจากน้ำมันรำข้าว โดยที่โหลดสูงสุดน้ำมันดีเซลมีค่าที่น้อยกว่าน้ำมันไบโอดีเซล 21.95, 22.70% ตามลำดับ ในส่วนของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคที่โหลดสูงสุดน้ำมันดีเซลมีค่าที่มากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว และจากน้ำมันรำข้าว 18.01, 18.50% ตามลำดับ จากการวัดค่าสารมลพิษจากไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิด พบว่าปริมาณควันดำของน้ำมันไบโอดีเซลลดลงน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ในส่วนของปริมาณ CO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> ของน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิดมีค่าที่มากกว่าน้ำมันดีเซลและมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามโหลดที่ใส่เข้าไป

**คำหลัก:** น้ำมันไบโอดีเซล, สมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล, การปล่อยสารมลพิษไอเสีย

## Abstract

This research was conducted to study the performance and emission of pollutants from the exhaust of diesel 4-cylinder 1753cc. The test at constant speed of 2000 rpm the load 30, 50, 70 Nm using diesel compared Pure biodiesel are 2 types of biodiesel from coconut oil and rice bran oil. The brake specific fuel consumption rate of diesel fuel with a value less than biodiesel from coconut oil and rice bran oil. The maximum load is less than diesel fuel biodiesel 21.95, 22.70% respectively. The brake thermal efficiency at maximum load the more fuel is biodiesel from coconut oil and from rice bran 18.01, 18.50% respectively. From the measurement of pollutants from the exhaust of the engine when using biodiesel fuel the amount of the 2 types of black smoke of diesel oil fell less than diesel. In terms of CO<sub>2</sub> emissions and NO<sub>x</sub> of the 2 types of biodiesel fuel and more valuable with the increasing load on the input.

**Keywords:** Biodiesel oil, Diesel engine performance, Emissions.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นโดยส่วนใหญ่ นำมาใช้ในภาคการขนส่งโดยเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ของประเทศได้จากปิโตรเลียมซึ่งมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศในด้านของมลพิษและผลกระทบต่อสุขภาพจากการปล่อยสารมลพิษต่างๆ จาก

แก๊สไอเสียของเครื่องยนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนและควันดำ ซึ่งทำลายสภาวะแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ [1] โดยไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่เกิดจากการนำน้ำมันพืชโดยนำน้ำมันพืชมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) กับแอลกอฮอล์ (เอทานอลหรือเมทานอล) โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นจะได้



**EMP-xx**

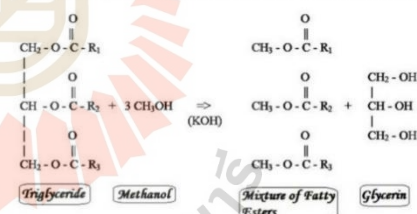
เอทิลเอสเทอร์หรือเมทิลเอสเทอร์ขึ้นกับแอลกอฮอล์ที่ใช้และสามารถนำไปใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ [1, 2] การผลิตไบโอดีเซลมีการศึกษาเป็นเวลานานแล้วโดยเฉพาะไบโอดีเซลจากเมทานอล เนื่องจากเมทานอลหาได้ง่ายมีราคาถูกและไบโอดีเซลที่ผลิตจากเมทานอลนั้นสามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยังให้ผลการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาสูงเมื่อเทียบกับแอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ ผลที่เกิดขึ้นจากการนำไบโอดีเซลไปใช้แทนน้ำมันดีเซลสามารถลดการปล่อยสารมลพิษจากการเผาไหม้เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ที่สูงทำให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น [2, 4] โดยการปล่อยสารมลพิษจากแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์ประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอน (HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) รวมถึงอนุภาคเล็กๆจากไอเสียของรถยนต์นั้นเป็นสาเหตุหลักของการเกิดมลพิษทางอากาศและยังส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจกขึ้น [2, 3] จากการศึกษาทำการวัดสมรรถนะของการปล่อยสารมลพิษแก๊สไอเสียระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง (direct injection) โดยทดสอบที่ความเร็วรอบต่างๆ ณ ภาระงานสูงสุด และที่ความเร็วรอบคงที่เปลี่ยนแปลงภาระงานต่างๆ โดยใช้เอทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากอัตราส่วนโมลของเอทานอลปราศจากน้ำความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5-99.9 ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนจากการใช้เอทิลเอสเทอร์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ขณะที่การใช้เอทิลเอสเทอร์ให้ค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (BSFC) สูงกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากเอทิลเอสเทอร์มีค่าความหนืดและความหนาแน่นมากกว่า และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล สำหรับการวัดปริมาณของสารมลพิษต่างๆเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่าการใช้เอทิลเอสเทอร์มีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอน (HC) และควีนตาลดลงในทางตรงกันข้ามมีการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO) เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของ O<sub>2</sub> ในองค์ประกอบทางเคมีของเอทิลเอสเทอร์ทำให้เกิดการเผาไหม้แบบสารผสมบางและมีเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น [1, 4, 6] น้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลผสมเอทานอลที่อัตราส่วนผสมต่างๆจะถูกนำไปทดสอบหาคุณสมบัติการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน (ดีเซล 100%) จากนั้นนำน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิดไปทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อทำการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่รอบการทำงานระหว่าง 1,200 - 2,500 รอบ ต่อ นาที แบบภาระงานเต็มที (Full load) สมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้แก่ แรงบิด

กำลังของเครื่องยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ อุณหภูมิของไอเสีย และวัดมลพิษที่รอบการทำงาน 2,400 รอบต่อนาที [7]

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค และการปล่อยสารมลพิษจากการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าวและจากน้ำมันมะพร้าวเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลโดยเครื่องยนต์ดีเซลถูกติดตั้งเข้ากับ Dynamometer ประเภทเบรคหน้าเพื่อทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 รอบ/นาที โดยโหลดที่ให้ผ่าน Dynamometer ประเภทเบรคหน้าแบ่งออกเป็น 3 ช่วง 30, 50 และ 70 N-m โดยสารมลพิษที่จะนำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย ไนตริกออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ถูกวัดโดยเครื่อง Testo 350 gas analyzer ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ถูกวัดโดยเครื่อง Horiba Mexa-584L และปริมาณควันดำถูกวัดโดยเครื่อง WAGER รุ่น 6500

**2. วิธีการดำเนินงานวิจัย**

กระบวนการ Trans-esterification เป็นกรดไขมันอิสระของสามโมเลกุลร่วมกัน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่จะตอบสนองกับแอลกอฮอล์ (เมทานอล) กับอัลคาไลน์ (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) เป็นตัวเร่งสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในการศึกษาที่กระบวนการหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะได้เป็นเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) และกลีเซอรอล ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้มีปริมาณของ O<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเชื้อเพลิง



รูปที่ 1 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดสอบทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมัน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1298 และ ASTM D240 พบว่าค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิดมีค่าที่มากกว่าน้ำมันดีเซล และในส่วนของค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าที่มากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิด

**EMP-xx**

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

ชนิดของน้ำมัน	ความหนาแน่น ณ 15.6 °c (kg/m <sup>3</sup> ) ASTM D1298	ค่าความร้อน เชื้อเพลิง (MJ/kg) ASTM D240
ดีเซล	836	46.486
ไบโอดีเซลน้ำมันรำข้าว	913	39.454
ไบโอดีเซลน้ำมันมะพร้าว	927	38.985

**2.1. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์**

การทดสอบเพื่อหาอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ เบรกและสารมลพิษจากไอเสียของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์เป็นเครื่องยนต์ดีเซล FORD XLD 418 สี่สูบ สี่จังหวะระบายความร้อนด้วยน้ำใช้ในการทดสอบน้ำมันดีเซล น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว และจากน้ำมันมะพร้าว

ตารางที่ 2 รายละเอียดเครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

Type	FORD XLD 418
Engine Number	D 1870/1 TL
Bore	82.5 mm
Stroke	82.0 mm
Number of Cylinder	4
Swept Volume	1753 cc
Compression Ratio	21.5 to 1
Maximum Power	37 kW at 3600 RPM
Maximum Speed	5000 RPM

เครื่องยนต์ถูกติดตั้งเข้ากับ Dynamometer แบบหน้า ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดซับกำลังของเครื่องยนต์โดยใช้เบรกน้ำซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงโหลดที่กระทำต่อเครื่องยนต์ได้โดยการปรับแรงดันน้ำ

ตารางที่ 3 รายละเอียด Dynamometer แบบหน้า

Make	GO-Power System
Type	D 316
Maximum Speed	10000 RPM

โดยงานวิจัยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 รอบต่อนาที โดยแต่ละน้ำมันที่ใช้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 โหลดคือ 30, 50 และ 70 N-m ในแต่ละโหลดจะทำการจับเวลาในการใช้เชื้อเพลิงเพื่อนำค่าที่ไปคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก



รูปที่ 2 เครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วติดตั้งเข้ากับ Dynamometer การปล่อยก๊าซมลพิษของไอเสียจากเครื่องยนต์ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 ทำการวัดค่าการปล่อยมลพิษไอเสียโดยตรงด้วยการสุ่มตัวอย่างจากท่อไอเสียโดยนำโพรวัดค่าของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซมลพิษไอเสียโดยความสามารถในการวิเคราะห์ NO<sub>x</sub> และ CO<sub>2</sub> อยู่ในช่วงของ 0-500 ppm และ 0-50% vol ตามลำดับโดยทำการวัดซ้ำสามครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ ในส่วนของการตรวจสอบสารมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ [6] ถูกวิเคราะห์ด้วย Testo 350 gas analyzer ใช้ในการวิเคราะห์ไนตริกออกไซด์ NO<sub>x</sub> และคาร์บอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Horiba Mexa-584L



รูปที่ 3 เครื่องมือวิเคราะห์ไอเสีย TESTO รุ่น TESTO 350



รูปที่ 4 เครื่องมือวิเคราะห์ไอเสีย HORIBA รุ่น MEXA - 584L ในส่วนของการวิเคราะห์ควันดำจากไอเสียที่ได้จากเครื่องยนต์ใช้เครื่องมือวัดความทึบแสงแบบไหลผ่านโดยความสามารถในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0-100% จะทำการวัดซ้ำสามครั้งโดยค่าที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง WAGER รุ่น 6500

**EMP-xx**



รูปที่ 5 เครื่องมือวิเคราะห์ควันท้า WAGER รุ่น 6500

**2.2. การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์**

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์นั้นทำการพิจารณาอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption, BSFC) คืออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยมวลต่อกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้ภายในระยะเวลาหนึ่งและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency,  $\eta_b$ ) เป็นค่าที่บ่งบอกให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่สามารถเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับจากเชื้อเพลิงไปเป็นงานได้มากน้อยเพียงใด โดยจะถูกคำนวณที่ภาระโหลดต่างๆซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$bsfc = \frac{m'_f}{P_b} \quad (1)$$

$$\eta_b = \frac{P_b}{m'_f Q_{HV}} \quad (2)$$

โดยที่

$P_b$  คือ กำลังเบรก Brake Power (Kw)

$m'_f$  คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/sec)

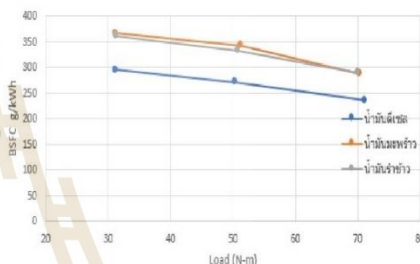
$Q_{HV}$  คือ ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง (MJ/kg)

**3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง**

ในการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิดคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันรำข้าว น้ำมันดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว และน้ำมันดีเซลในห้องตลาด มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และก๊าซมลพิษที่ได้จากไอเสียที่ความเร็วรอบคงที่ 2,000±50 รอบต่อนาที โดยแบ่งภาระโหลดเป็น 3 ช่วงคือ 30 ,50 และ 70 N-m ตามลำดับ

**3.1. อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก**

จากรูปที่ 6 แสดงอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) ตามโหลดต่างๆที่ใส่เข้าไปเมื่อพิจารณาที่โหลดสูงสุดพบว่าน้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าว และจากน้ำมันรำข้าวมีค่า(bsfc) เท่ากับ 236.179, 288.0244 และ 289.783 g/KWh ตามลำดับจะเห็นได้ว่าไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิดมีค่า (bsfc) ที่มากกว่าน้ำมันดีเซลโดยที่โหลดสูงสุดของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวมากกว่าน้ำมันดีเซล 21.95, 22.70% ตามลำดับ เนื่องจากค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลดังตารางที่ 1 ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเมื่อรับภาระโหลดที่เท่ากันส่งผลให้ค่า (bsfc) ที่ได้มีค่าที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล

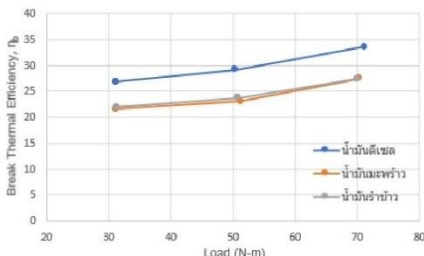


รูปที่ 6 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

**3.2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก**

จากรูปที่ 7 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก ( $\eta_b$ ) ตามโหลดต่างๆที่ใส่เข้าไปเมื่อพิจารณาที่โหลดสูงสุดพบว่าน้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวมีค่า  $\eta_b$  เท่ากับ 33.511, 27.478 และ 27.312 g/KWh ตามลำดับจะเห็นได้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิดมี  $\eta_b$  ที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่โหลดสูงสุดของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าว น้อยกว่าน้ำมันดีเซล 18.01, 18.50% ตามลำดับ เนื่องจากค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าที่มากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิด ดังตารางที่ 1 เมื่อทดสอบที่ภาระงานเท่ากัน น้ำมันไบโอดีเซลจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

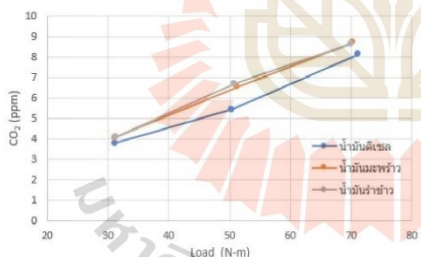
**EMP-xx**



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรก

**3.3. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์**

จากรูปที่ 8 แสดงการปล่อยก๊าซมลพิษทางไอเสียของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ที่สภาวะโหลดต่างๆที่ใส่เข้าไปเมื่อพิจารณาที่โหลดสูงสุดพบว่าน้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวมีค่า CO<sub>2</sub> อยู่ที่ 8.12, 8.72, 8.66 ppm ตามลำดับจะเห็นได้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิดมี CO<sub>2</sub> ที่มากกว่าน้ำมันดีเซลโดยที่โหลดสูงสุดของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวมากกว่าน้ำมันดีเซล 7.39, 6.65% ตามลำดับเนื่องจากปริมาณของ CO<sub>2</sub> เกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์ระหว่างคาร์บอน (C) ของเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยากับ O<sub>2</sub> ของอากาศ โดยที่น้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณของ O<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเชื้อเพลิงส่งผลให้ CO<sub>2</sub> ของน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล

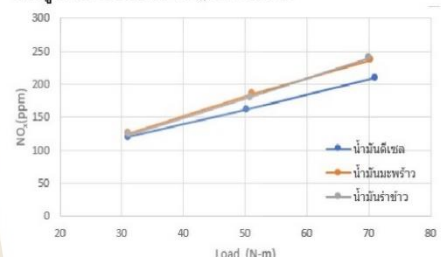


รูปที่ 8 ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์

**3.4. ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์**

จากรูปที่ 9 แสดงการปล่อยก๊าซมลพิษทางไอเสียของไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่สภาวะโหลดต่างๆที่ใส่เข้าไปเมื่อพิจารณาที่โหลดสูงสุดพบว่าน้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวมีค่า NO<sub>x</sub> อยู่ที่ 209.9, 236.7, 239.5 ppm ตามลำดับจะเห็นได้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิดมี NO<sub>x</sub> ที่มากกว่าน้ำมันดีเซลโดยที่

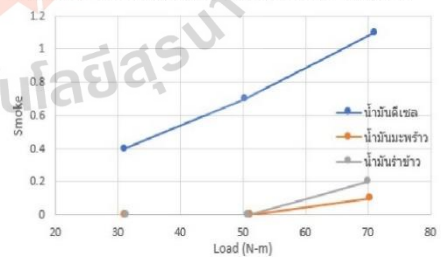
โหลดสูงสุดของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวมากกว่าน้ำมันดีเซล 12.77, 14.10%ตามลำดับเนื่องจากอัตราเกิดสารมลพิษ NO<sub>x</sub> นั้นขึ้นกับอุณหภูมิของการเผาไหม้เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณ O<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบมากกว่าน้ำมันดีเซลทำให้เกิดการเผาไหม้ได้รวดเร็วขึ้นส่งผลให้มีการปลดปล่อยพลังงานในช่วงนี้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มโหลดให้กับเครื่องยนต์ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นจึงมีปริมาณ NO<sub>x</sub> มากขึ้นด้วย



รูปที่ 9 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค

**3.5. ปริมาณควันดำ**

จากรูปที่ 10 แสดงค่าการปล่อยควันดำจากไอเสียของรถยนต์โดยเป็นการตรวจวัดเป็นร้อยละความเข้มของแสงที่สภาวะโหลดต่างๆที่ใส่เข้าไปเมื่อพิจารณาที่โหลดสูงสุดพบว่าดีเซลมีปริมาณควันดำที่มากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้ง 2 ชนิดเนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณของ O<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลักทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นทำให้ปริมาณควันดำลดลงเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล โดยที่โหลดสูงสุดน้ำมันดีเซล, น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวมีค่าอยู่ที่ 1.1, 0.1, 0.2 ตามลำดับเมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณค่าควันดำ โดยน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวจะมีปริมาณค่าควันดำที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซล 90.91, 81.82% ตามลำดับ



รูปที่ 10 ปริมาณควันดำ

## EMP-xx

### 4. สรุป

จากการทดสอบสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษของเครื่องยนต์ใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและจากน้ำมันรำข้าวเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลโดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 รอบ/นาที แบ่งภาระโหลดออกเป็นสามช่วง 30, 50, 70 N-m

4.1 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคของน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

4.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของน้ำมันดีเซลจะมีค่ามากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลทั้งสองชนิดเนื่องจากภาระงานเท่ากันน้ำมันไบโอดีเซลจะมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำมันดีเซลส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

4.3 การปล่อยสารมลพิษที่ได้จากเครื่องยนต์โดยปริมาณควันทาลดลงน้อยกว่าน้ำมันดีเซลในส่วนของ  $\text{NO}_x$  เพิ่มขึ้นตามปริมาณ  $\text{O}_2$  ที่เพิ่มมากขึ้นมีผลให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในการปล่อย  $\text{CO}_2$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้น

### 5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษารังนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการในการทดสอบและเก็บข้อมูลสมรรถนะและสารมลพิษของเครื่องยนต์ต่อน้ำมันไบโอดีเซล

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกชัย สุธีร์ศักดิ์. "สมรรถนะ และ การ ปล่อย สาร มลพิษ ของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้น้ำมันพืช: การทบทวน." *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อ.บ. 7.1* (2016): 65-80.
- [2] Baiju, B., M. K. Naik, and L. M. Das. "A comparative evaluation of compression ignition engine characteristic using methyl and ethyl esters of Karanja oil." *Renewable energy* 34.6 (2009): 1616-1621.
- [3] Alkabbashi, A. N., Alam, M. Z., Mirghani, M. E. S., & Al-Fusaid, A. M. A. (2009). Biodiesel Production from Crude Palm Oil by Triinsesterificatioi Process. *Journal of Applied Sciences*, 9(17), 3166-3170.
- [4] วราคม วงศ์ชัย (2560). การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศและผลของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลต่อสมรรถนะและก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, หน้า 667-680.

[5] ไพบุลย์ สิห์ลำน้อย, อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง และ พิชัย อัญมมงคล (2550). การศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ดีโซฮอล์ชนิดบิวทานอลเป็นส่วนผสม, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และกองวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จังหวัดนครนายก

[6] ยงศธร โคตบุตร, พลรวี วรรณวิโร และกาญจนา พังสุวรรณรักษ์ (2561). การลดมลพิษจากเครื่องยนต์อัตรระเบิดโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลปาล์มผสมกับสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

[7] อธิพิพล วรพันธ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, สงบพิทย์ พงศ์สถาบตี และ เตนพงศ์ สุดภักดี (2549). สมรรถนะและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วผสมเอทานอลเป็นเชื้อเพลิง, *วิศวกรรมสาร มช.* ปีที่ 33, ฉบับที่ 6, (691 - 705).

[8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2556). ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะ และ คุณ ภาพ ของ น้ำมัน ดี เซล , [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.doeb/dtanotice/cancel-diesel25-01-56.pdf>, เข้าดูเมื่อวันที่ 10/03/2562.

## Effect of Nano-TiO<sub>2</sub> Additives Blended in Palm Biodiesel on Compression Ignition Engine Performance

Karoon Fangsuwannarak, Thipwan Fangsuwannarak, and Yongsathon Khotbut

**Abstract**—The property improvement of palm oil biodiesel (POB) was investigated by mixing a nano-TiO<sub>2</sub> additive in order to achieve in the decrease of exhaust emissions of a diesel engine. The different POB fuel fractions were used including B10, B20, B30, B40, B50, and B100 which are compared with commercial diesel B2 as a fuel standard. The results suggested that the small amount of 0.1% wt nano-TiO<sub>2</sub> additive provided the property improvement such as a decrease in kinematic viscosity and an increase in flash point, cetane index, and heating values. However, there are B2+0.1%TiO<sub>2</sub> and B10+0.1%TiO<sub>2</sub> providing their properties to be accepted in ASTM standard. The experimental results suggested that engine power and torque increased during the range of low engine speed (<2500 rpm) and became decreased during the higher range of engine speed (>3000 rpm). Carbon oxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and nitric oxide (NO<sub>x</sub>) emissions were measured directly at the tailpipe in order to observe the effect of POB fuel used on the gas emissions. It was found that nano-TiO<sub>2</sub> additive significantly contributed the reduction of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions.

**Index Terms**—Palm biodiesel, nano-TiO<sub>2</sub> additives, compression ignition, engine performance.

### I. INTRODUCTION

In the present, environmental concerns increase due to decreasing fossil fuel and increasing ambient air pollution from gasoline engine in particular high-speed diesel engine. Biodiesel fuels can clearly provide positive environmental benefits because of one involvement of high oxygen content in biodiesel fuel to be biodegradable through antioxidant mechanism [1]. Biodiesel as an alternative fuel available for diesel engine is predominantly produced from virgin vegetable oil or animal fats through the chemical reactions to involve transesterification and esterification processes. In Thailand, palm oil biodiesel (POB) fuel is playing an important role on the bioenergy development due to having a massive energy plantation. The renewable and alternative energy development plan has set up the production target at 4.5 million liters/day in 15-year plan. Nevertheless, the massive palm feedstock has been concerned and managed for reducing adverse impact on the environment [2]. While biodiesel is becoming cost competitive with fossil fuels owing to the widespread availability of biomass resource [3], [4]. Meanwhile, previous studies presented that a decrease

in engine power relates to an increase in volume fraction of palm oil biodiesel (POB) [5], [6]. These causes lead to more studies to upgrade the fuel quality and engine performance as well as reduction of exhaust emissions without modifying diesel engine. In addition, there are many studies to focus on the improvement of POB properties by blending an effective additive in the optimal diesel fuel fraction [7]-[9]. While tailpipe emission from using POB fuel depend on the POB blend in diesel fuel used, the kind of additive used, and the type of engine. Nano-titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) additive is a kind of metal oxide materials to be claimed that it can improve solid propellant burn rates. It would result from the high surface-to-volume of the nanoparticles to provide a better catalyst than traditional additives [10]. However, the effect of nano-TiO<sub>2</sub> additive on exhaust emissions have not studied extensively in order to improve air quality. The demonstrations in this study were performed without any modifying engine.

This work studied the effect of nano-TiO<sub>2</sub> blend into palm biodiesel on the properties comparing with ASTM standard. Moreover, engine performance test was demonstrated on a FPS 2700 chassis dynamometer. Exhaust emissions such as NO<sub>x</sub>, CO and CO<sub>2</sub> from operation of an indirect injection pick-up diesel engine were studied under SAE J816B standard. The exhaust emission results were presented.

### II. EXPERIMENTAL PROCEDURES

#### A. Preparation of Palm Oil Biodiesel

In this study, the POB fuel mixtures of purified palm oil and premium diesel oil were measured to verify their properties. The various fractions of palm fuel in diesel were investigated including 2%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, and 100% palm biodiesel with the rest of diesel fuel fraction denoted as B2, B10, B20, B30, B40, B50, and B100, respectively. In this experiment, small amount of nano-TiO<sub>2</sub> of 0.1% by weight was used as a catalyst. The properties of the tested fuel were measured including kinematic viscosity, flash point, cetane index, and heating values. The experimental results were compared with the properties of B2 to be a commercial POB diesel. The composed POB fuel from the mixture of purified palm oil, premium diesel, and 0.1%wt nano TiO<sub>2</sub> additive was blended by means of an ultrasonic shaker for 15 minutes in order to provide the uniform suspension.

#### B. Engine Performance Testing

The used vehicle in this experiment was a standard pickup car with a manual gear box. The schematic of the experiment setup is depicted in Fig. 1.

Manuscript received January 9, 2020; revise March 31, 2020.

K. Fangsuwannarak and Y. Khotbut are with School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand (e-mail: karoon@sut.ac.th).

T. Fangsuwannarak is with School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

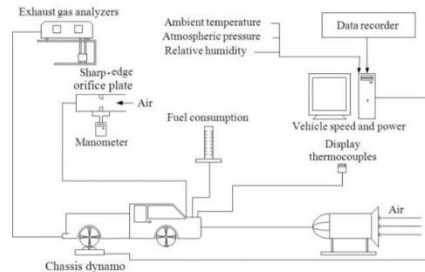


Fig. 1. Schematic of experiment set up.

The tested engine specifications were listed in Table I. The FPS 2700 chasis dynamometer under the simulation of road load conditions with eddy current brake was conducted in this experiment. Measuring accuracy of the chasis dynamometer is of  $\pm 2\%$ . The performance correction was used by following a standard of SAE J. 1349. The accuracy of wheel power of  $\pm 3\%$  was obtained. Fuel consumption system was set up and coupled with the fuel pump in order to examine the amount of fuel consumption. Each engine test was repeated 3 times to ensure the average data calculation for the analysis. Owing to the different fuels tested, each engine test was on a standard of the operating conditions.

TABLE I: SPECIFICATIONS OF THE TESTED ENGINE

Engine	TD27(New)
Displacement	2663 cc
Bore x Stroke	96.0 X 92.0 mm
Cooling system	Water cool
Intake Method	Natural aspiration
Maximum Power	83.8 bhp@4000rpm
Maximum Torque	166Nm@2200rpm

### C. Exhaust Emission Testing

According to SAE J816B specifications, exhaust emissions were measured by a Testo 350 gas analyzer. Measurement capacity for  $\text{NO}_x$ , CO, and  $\text{CO}_2$  is in the range of 0-500 ppm, 0-10,000 ppm, and 0-50% vol., respectively. Exhaust emissions were measured directly at tailpipe by the analyzer probe. The test cycle was repeated three times.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### A. Comparative Properties of POB Fuels

The aim of using additive is to improve the quality of POB fuel blend in order to possibly further use the less diesel. The properties of the different POB fuels showed the measured results to involve their identity quality in Table II. The results suggested that small amount of nano- $\text{TiO}_2$  of 0.1%wt provides the significant improvement of the fuel quality to compare with different POB fuel blends with no additive. It is noted that nano- $\text{TiO}_2$  contributed to increase flash point, cetane index and heating value, in addition, to reduce kinematic viscosity of POB fuels. Therefore, the data obtained from testing POB fuels belongs to the ASTM standards for B2, B10, B30, and B40 with dosing nano- $\text{TiO}_2$ .

TABLE II: COMPARATIVE PROPERTIES OF POB FUELS

Fuel	Kinematic Viscosity (cSt)	Flash point (°C)	Cetane index	Heating value (MJ/kg)
ASTM Standard	ASTM D445 1.8-4.1	ASTM D93 > 52	ASTM D976 > 50	ASTM D240 > 42.5
B2	3.92	66	56.87	44.39
B10	4.02	65	55.99	43.79
B20	4.11	70	56.92	43.64
B30	4.16	85	56.30	37.25
B40	4.38	83	56.53	37.40
B50	4.52	90	55.22	38.22
B100	5.46	135	49.04	37.62
B2+0.1%	3.64	76	57.05	42.74
B10+0.1%	3.80	74	57.36	41.69
B20+0.1%	4.05	70	57.07	40.48
B30+0.1%	4.16	84	56.58	44.32
B40+0.1%	4.34	80	55.91	43.12
B50+0.1%	4.38	82	54.90	40.41
B100+0.1%	5.34	150	49.55	39.80

### B. Comparative Engine Performance

Fig. 2 shows the engine power from using different POB fuel blend to be dosed by nano- $\text{TiO}_2$  additive. All tests provided the maximum power at engine speed of 4000 rpm. It was found that the increased trend of the power for POB fuel mixing the additive is similar to B2. Almost all the POB fuels mixing the additive provided the small increase of power at the range of low engine speed ( $< 2500$  rpm) comparing with B2 but the measured power became lower at the range of higher engine speed ( $> 3000$  rpm.) It is mostly possible due to that the properties of heating value and cetane index of POB fuel were improved from the blend of nano- $\text{TiO}_2$  additive.

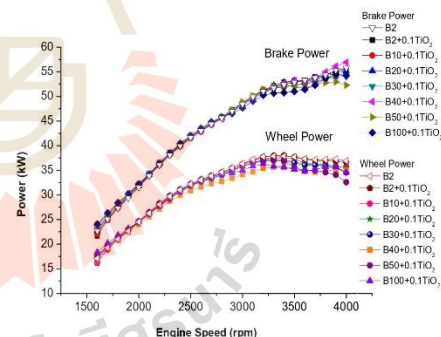


Fig. 2. Power of the engine to consume the different POB fuel blends comparing with B2.

Fig. 3 presents the torque of engine operation with different POB fuel used. The maximum torque is 166 Nm at engine speed of 2200 rpm. Similarly, torque curve for POB fuels does by additive showed the similarity trend comparing with B2 used. It was seen that engine torque increased at the range of low engine speed ( $< 2500$  rpm.) comparing with B2. On the other hand, engine torque values decrease when the engine operates at the range of higher engine speed ( $> 3000$  rpm).

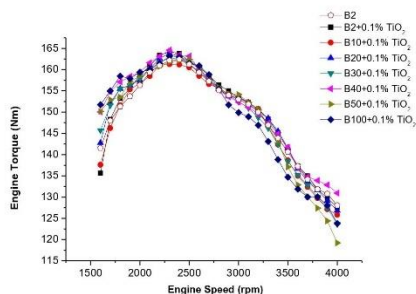


Fig. 3. Torque of the engine to consume the different POB fuel blends comparing with B2.

### C. Exhaust Gas Emissions

Carbon oxide (CO), carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), and nitric oxide ( $\text{NO}_x$ ) emissions were directly measured during the engine was operating at 1500, 2000, 2500, and 3000 rpm in order to observe the variation of exhaust gas emissions. The comparison of CO results of POB fuel blend with additive used and B2 used was illustrated in Fig. 4. The results showed that the CO emission quantity significantly reduced at higher engine speed (2500-3000 rpm.) in particular B10+0.1%, B20+0.1%, and B30+0.1% $\text{TiO}_2$ . The main cause would be from the increase of oxygen composition in vegetable oil to result in more completely internal combustion in the engine and then lead to obviously reduction of CO emission [4], [9]. At low engine speed of 1500 rpm., all POB fuel tests provided more CO emission results than used B2 except using B2+0.1% $\text{TiO}_2$  that obviously reduced CO emission. Thus, 0.1% nano- $\text{TiO}_2$  in the optimal POB fuel blend is a very effective use of CO reduction for a high speed engine due to that nano- $\text{TiO}_2$  acts as an oxidation catalyst.

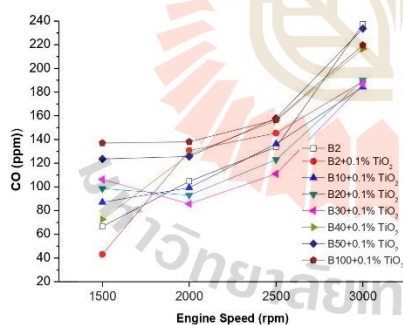


Fig. 4. Variation of CO emission for different POB fuels with mixing 0.1%wt nano- $\text{TiO}_2$  comparing with B2 standard fuel.

Fig. 5 shows the effective decrease of  $\text{CO}_2$  emission during engine operation at 1500 – 3000 rpm. The results suggested that the maximum  $\text{CO}_2$  reduction at 1500 rpm is by 23%, 33%, and 43% for B10+0.1%, B20+0.1%, and B30+0.1% $\text{TiO}_2$ , respectively, that compared with B2. Meanwhile, at 3000 rpm, the  $\text{CO}_2$  emission results for B10+0.1%, B20+0.1%, and B30+0.1% $\text{TiO}_2$  comparing

with B2 provided the decreased values by 11%, 14%, and 21%, respectively.

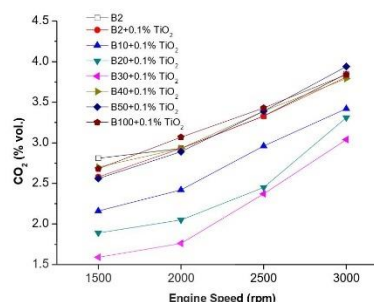


Fig 5. Variation of  $\text{CO}_2$  emission for different POB fuels with 0.1%wt nano- $\text{TiO}_2$  additive comparing with B2 standard fuel.

$\text{NO}_x$  emission can affect directly the corrosive in engine system. The variation of  $\text{NO}_x$  emission under engine operation using the POB fuels was measured at the different speeds and provided the results as depicted in the Fig. 6. It was found that almost all the POB fuels with mixing nano- $\text{TiO}_2$  additive provided the effective reduction of  $\text{NO}_x$  emission throughout the speed range, whereas B2+0.1% $\text{TiO}_2$  fuel contribute the increase of  $\text{NO}_x$  in the range of engine speed at 2500 – 3000 rpm. It may occur the feature of the inappropriate mixture of air and the fuel during combustion at higher engine speed. The maximum  $\text{NO}_x$  reduction was obtained from using B30+0.1% $\text{TiO}_2$  by 61%, 49%, 29%, and 17% at 1500, 2000, 2500, and 3000 rpm, respectively, that compared with B2.

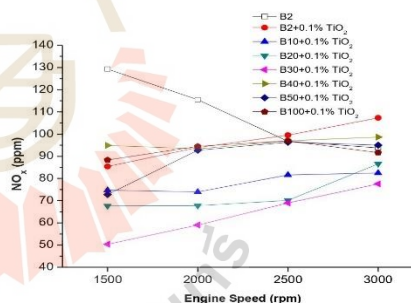


Fig 6. Variation of  $\text{NO}_x$  emission for different POB fuels with 0.1%wt nano- $\text{TiO}_2$  additive comparing with B2 standard fuel.

## IV. CONCLUSIONS

The quality improvements of palm oil biodiesel fuel were investigated in order to compensate the diesel fuel consumed increasingly. There is not only the use of an alternative POB fuel for above reason but the POB fuel also contributes the reduction of gas emissions. In this work, we studied the effect of nano- $\text{TiO}_2$  additive mixed in the different POB fuel fractions on the performance of an indirect injection diesel engine and exhaust emissions. The results suggested that POB fuel properties were improved by



nano-TiO<sub>2</sub> additive as a catalyst. The improved properties of the POB fuels related to the improvement of engine power and torque that provided the similarity of the results from using B2. Meanwhile, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions for B30+0.1%TiO<sub>2</sub> extremely reduced by 43% and 61%, respectively at the engine speed of 1500 rpm that compared with the results for B2. While, the engine operated at 3000 rpm, then B30+0.1%TiO<sub>2</sub> provided CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions reduced by 21% and 17%, respectively.

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

Dr. Karoon Fangsuwannarak conducted the research; Mr. Khotbut, Dr. Karoon Fangsuwannarak and Dr. Thipwan Fangsuwannarak analyzed the data; Dr. Karoon Fangsuwannarak and Dr. Thipwan Fangsuwannarak wrote the paper; all authors had approved the final version.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

#### REFERECES

- [1] A. Demirbas, "Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines," Springer-Verlag London limited, ISBN: 978-1-84628-994-1, 2008.
- [2] S. Sampattagul *et al.*, "Life cycle assessment of palm oil biodiesel production in Thailand," *International Journal of Renewable Energy*, vol. 6, no. 1, 2011.
- [3] N. Alkabbashi, M. Z. Alam, M. E. S. Mirghani, and A. M. A. Al-Fusaief, "Biodiesel production from crude palm oil by transesterification process," *Journal of Applied Sciences*, 2009.
- [4] J. B. Nduwayezu, T. Ishimwe, A. Niyibizi, and A. Munyentwali, "Biodiesel production from unrefined palm oil on pilot plant scale," *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 2015.
- [5] M. A. Kalam and H. H. Masjuki, "Testing palm biodiesel and NPAA additives to control NOx and CO while improving efficiency in diesel engines," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, 2008.
- [6] M. Guru *et al.*, "Biodiesel production from waste animal fat and improvement of its characteristics by synthesized nickel and magnesium additive," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, 2009.
- [7] G. R. Kannan *et al.*, "Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel," *Applied Energy*, vol. 88, 2011.
- [8] A. Selvaganapathy, B. Sundar, Kumaragurubaran, and P. Gopal, "An experimental investigation to study the effects of various nano particles with diesel on DI diesel engine," *ARPJ Journal of Science and Technology*, 2013.
- [9] S. Karthikeyan, A. Elango and A. Prathima, "Performance and emission study on zinc oxide nano particles addition with pomolion stearin wax biodiesel of CI engine," *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2014.
- [10] United States Patent Application Publication Hussain *et al.*, Patent No. UA 2011/0209389 A1, 2011.

Copyright © 2020 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited (CC BY 4.0).



**K. Fangsuwannarak** was born in Surin, Thailand in 1970. He received the B. Eng. degree in mechanical engineering from Vongchaitkul University and M. Eng. and Ph.D. degree in mechanical engineering from Khon Kean University, Thailand, in 2014.

From 2008 to 2019, he has been an assistant professor with the mechanical engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His research interests include internal combustion engine, automotive engineering, alternative energy and heat transfer.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## Effect of a variable compression ratio on the performance and exhaust emission of an agricultural engine using palm biofuel

Yongsathon Khotbut (a), Karoon Fangsuwannarak (a), Thipwan

Fangsuwannarak (b), Maethas Phantoun (a) and Suriya Phankosol (c)

[a] School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

[b] School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

[c] Department of Industrial and Technology Management, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok, 10600, Thailand.

\* Author for correspondence E-mail: karoon@sut.ac.th

Received:

Accepted:

### ABSTRACT

Palm oil biodiesel (POB) has a number of beneficial properties of the environment due to less exhaust emission (carbon monoxide, hydrocarbon, and smoke). It can lead to a reduction of pollution by decreasing the emission of harmful and hazardous substances to the atmosphere. In this work, palm biofuel was produced in house from crude palm oil with transesterification reaction carried out using a base catalyst. A low-speed agriculture engine under the variable load range of 3-12kg at a constant speed of 1500 rpm was investigated the several combustion characteristics under ASTM standards. The effect of a variable compression ratio (VCR) from 16 to 18 on low-speed engine performance and the gas emission was investigated in order to find out the optimal values of compression ratio (CR) low-speed engine. The experimental results are found that this engine fueled by the biofuel under test load at 12kg obtained the highest thermal efficiency of 27% at the compression ratio of 18, while its brake specific fuel consumption reduced with the increase of the test load. An increase up to CR18 presents the consistent explanation of the higher heat release and the shorter ignition delay, while the amount of carbon monoxide and hydrocarbon emission effectively reduced down to 42% and 21%, respectively. The optimum performance of the low-speed agriculture engine was found in CR value of 18 during full load condition.

**Keywords:** Palm biofuel; Variable compress ratio; Combustion characteristics; Engine performance; Exhaust emission

## 1. INTRODUCTION

The largest increase in the number of automobiles for transportation and agriculture machines has resulted in greater demand for petroleum products with the trend of fast depletion of world petroleum reserves [1]. The main point of the world energy demand in the last two decades has encouraged the researchers searching for new alternative energy sources such as biofuels, solar energy, wind energy, and biomass [2]. Biodiesel is an alternative fuel due to its various advantages, such as abundant biomass resources, biodegradable and environmental friendliness over fossil fuel [3]. Moreover, biodiesel predominantly produced from biomass is becoming cost-competitive with fossil fuels due to the widespread availability of biomass resource [4].

In the present, palm oil is a trade commodity to cause direct competition between using palm oil for biodiesel production and using for food. This reason leads to an increase in the price of both uses. Nevertheless, the raw palm has a massive energy plantation in Thailand and the benefit of the environment and the local population. For the palm oil biodiesel (POB) production, trans-esterification of palm oil with methanol to obtain POB was carried out using potassium hydroxide (KOH) catalyst [5]. ASTM standard fuel tests performed on the POB, in particular, POB blend with nano-additive material provided the promising results such as improvement of engine power and reduction of brake specific fuel consumption and exhaust emissions [6,7]. Biodiesel with high oxygen content is biodegradable through antioxidants, whereas petroleum has essentially none [3]. Furthermore, there are more studies to improve the fuel quality and engine performance without modifying diesel engine.

However, diesel engine generally emits exhaust more than emission from a gasoline

engine, which causes higher pollution.

Decreasing fossil fuel and increasing ambient air pollution force the research on cleaner alternative fuels concern biodiesel for diesel engines. Moreover, biodiesel predominantly produced from biomass is becoming cost-competitive with fossil fuels due to the widespread availability of biomass resource [7]. The previous researches were investigated the waste cooking oil biodiesel to effect on diesel engines. It was found the better engine performances with the low gas exhaust except  $\text{NO}_x$  gas. The torque and thermal efficiency decreased by 9% and 11%, respectively, whereas the fuel consumption increased by 17% as biodiesel ratio increased up to 50% [8-9]. Moreover, an increase in compression ratio has an effect on the deterioration reduction of the diesel engine performance fueled with the high biodiesel blending percentage [10].

In this study, the palm oil biodiesel produced from palm oils with varying blend ratio of biodiesel was investigated. The experiments were conducted on load condition 3, 6, 9, and 12 kg or brake power 0.86, 1.71, 2.57, and 3.42 kW, compression ratios of 16, 17 and 18 at an engine speed of 1500rpm.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Crude palm oil extracted from palm seeds, usually exhibits high viscosity values, making them unsuitable to be used as a fuel for continuous running. Therefore, a process called trans-esterification is performed so as to reduce the viscosity by treating the crude oil with alcohols (commonly ethanol or methanol) wherein a by-product is obtained in the form of glycerol which has to be separated. The trans-esterification reaction is a stage of converting oil or fat into methyl esters

### 2.1 Biodiesel production from palm oil

Palm oils primarily contain triglycerides, and their chemical structure is significantly different from that of mineral Diesel. Transesterification is an efficient method to convert high viscosity palm oil into a fuel with chemical properties similar to those of mineral Diesel. POB was prepared from palm oil and methanol by using potassium hydroxide (KOH) as a catalyst through transesterification process. In such biodiesel production, the effect of oil to methanol molar ratio 1:6, catalyst concentration 1% by weight, reaction temperature 60°C and reaction time 60 min on the yield of transesterification was studied. The biodiesel yield percentage is the factor that indicates the amount of actual biodiesel yield ( $Y_{act}$ ) compared with the theoretical biodiesel yield. The theoretical biodiesel yield ( $Y_{th}$ ) and biodiesel yield percentage (%Y) can be calculated from the following equations.

$$Y_{th} = \frac{N \times MW_{POB} \times m_{PalmOil}}{MW_{PalmOil}} \quad (1)$$

$$\%Y = \frac{Y_{act}}{Y_{th}} \quad (2)$$

when,

- $Y_{act}$  - actual biodiesel yield (g)
- $Y_{th}$  - theoretical yield of biodiesel (g)
- N - mole number of biodiesel per mole amount of crude vegetable oil
- $m_{PalmOil}$  - crude palm oil mass (g)
- $MW_{POB}$  - molecular weight of palm oil methyl ester (285.60g/mol)
- $MW_{PalmOil}$  - molecular weight of crude palm oil (846.94g/mol)

From Figure 2, it shows the gas chromatograph profiles of biodiesel, which can conclude to Table3. The Table3 shows the main

components are palmitic acid (39.18%), oleic acid (43.88%) and linoleic acid (10.57%). We can find the average molecular weight of palm methyl ester from the table3 equal to 285.6g/mol and the result of the transesterification reaction with palm oil 4000 g reaction results in actual biodiesel yield ( $Y_{act}$ ) of 3989.47 g. The results of the calculation are able to obtain the theoretical yield of biodiesel ( $Y_{th}$ ) of 6369.29 g and the yield percentage (%Y) of 62.64%.

### 2.2. Testing of fuel properties

This research measures the fuel properties of biodiesel from palm oil and diesel oil. Thailand has set the standard for biodiesel by the Department of Energy Business, Ministry of Energy. This is due to the requirement of the quality control for the engine using. The experimental results of fuel properties were measured as shown in Table 1. Specific gravity, density and the flash point values are obtained in the standard of the criteria set by the Department of Energy Business but viscosity value is equal to 5.57 cSt, which is higher than the standard criteria (0.57 cSt) compared to diesel oil. This viscosity result of palm oil has related to the higher flash point and its density.

### 2.3 Experimental test setup and procedure

In a single-cylinder direct injection diesel engine with the naturally aspirated, water-cooled system was used for the engine test to evaluate engine performance and exhaust emissions. The engine was operated by using diesel fuel and the results were used as reference values. Thus, the comparison results obtained from the engine fueled with POB compared with diesel fuel. The engine specification is shown in Table 2. The experimental installation diagram is drawn schematically in Figure 1. An eddy current dynamometer equipped with a load cell was used

to load the engine. The engine was tested at a constant speed of 1500 rpm with varying four-engine operating loads (3, 6, 9, and 12 kg or brake power 0.86, 1.71, 2.57, and 3.42 kW), which represents the range of the engine operating condition from low to high levels and variable compression ratios 16, 17, and 18. Exhaust

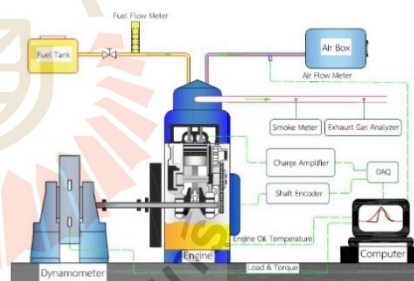
emissions were measured by standard exhaust gas analyzers : Testo 350 for CO and NO<sub>x</sub>, Horiba Mexa-584L for HC and WAGER DIGITAL SMOKE METER MODEL 6500 for smoke emissions. In each condition tested, the engine was stabilized by the observation of exhaust temperatures and exhaust emission.

**Table 1.** Properties of Diesel and Palm oil biodiesel (POB)

Property	Standard test	Diesel	Biodiesel
Kinematic viscosity @40 °C (cSt)	ASTM D445	4.12	5.57
Flash point (°C)	ASTM D93	59	154
Specific Gravity 15.6 °C	ASTM D1298	0.830	0.87
Density 15.6 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	829.253	874.200
Cetane Index	ASTM D976	56	50
Heating Value (MJ/kg)	ASTM D240	46.48	40.54

**Table 2.** Technical specifications of diesel engine test

Engine	Specification
Model	TV1
Make	Kirloskar Oil engines
Engine type	1 cylinder, 4 strokes, Direct injection
Bore	87.5 mm
Stroke	110 mm
Connecting rod length	234 mm
Swept volume	661 cc
Rate output	3.5 kW at 1500 rpm
Compression ratio	12:18
Dynamometer	Eddy current, Water cooled



**Figure 1.** Diagram of the installation system of the engine test.

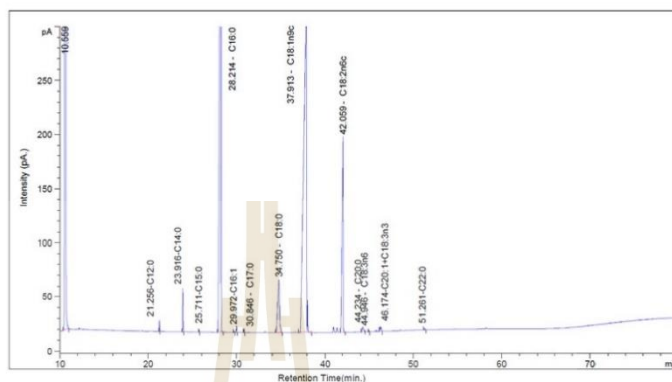


Figure 2. Gas chromatograph profiles of Palm Oil Biodiesel (POB)

Table 3. Total fatty acid methyl esters (FAMEs) quantification in POB by 7890GC Gas chromatograph together with all the identified compounds with their area and retention time

Peak NO	Retention Time	Name	C No.:Dbl.Bnd	Molecular Weight	Area(pA*s)	%FAME
1	21.256	Lauric acid	C12:0	214.351	31.29091	0.21
2	23.916	Myristic acid	C14:0	242.405	138.63071	0.90
3	25.711	Pentadecanoic acid	C15:0	256.432	6.62916	0.04
4	28.214	Palmitic acid	C16:0	270.459	6155.0523	39.18
5	29.972	Palmitoleic acid	C16:1	268.459	26.88735	0.18
6	30.846	Heptadecanoic acid	C17:0	284.486	15.14251	0.16
7	34.75	Stearic acid	C18:0	298.513	679.21252	4.25
8	37.913	Oleic acid	C18:1n9c	296.513	7053.6738	43.88
9	42.059	Linoleic acid	C18:2n6c	294.513	1624.8065	10.57
10	44.234	Arachidic acid	C20:0	326.567	48.10182	0.29
11	44.946	$\gamma$ -Linolenic acid	C18:3n6	292.513	7.27151	0.05
12	46.174	Henicosanoic acid	C20:1+C18:3n3	324.567	34.58462	0.22
13	51.261	Behenic acid	C22:0	354.621	8.34671	0.05

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Engine performance

The results of engine performance were tested, including the combustion feature and pollution caused incomplete combustion.

The comparative results of using diesel with POB in a diesel engine, which are shown in the following test results.

##### 3.1.1 Brake Specific Consumption

Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) is the rate of fuel consumption by mass per unit power produced from the engine within one unit of time. Figure 3 shows the fuel consumption of the brake. BSFC with tested POB has a higher fuel consumption ratio than diesel under all load conditions due to the less heating value of biodiesel than that of diesel fuel. Thus, in order to obtain the same thermal energy, engine fueled by POB requires a greater amount of fuel than diesel. When the compression ratio increases, BSFC with tested POB becomes closer and approach to BSFC with tested diesel fuel. It is due to the increase in the ratio resulting in the shorted ignition delay, which is able to compensate the disadvantages view points of the higher POB viscosity and the lower cetane index than that of diesel as shown Table 1. An increase of the compression ratio of an engine fueled by POB is able to improve the easier ignition and more combustion [11].

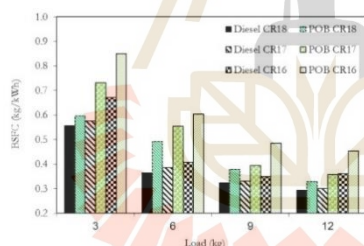


Figure 3 Brake Specific Consumption (BSFC) with load.

### 3.1.2 Brake Thermal Efficiency

Brake Thermal Efficiency (BTE) of engine is the ability to change the heat energy obtained from the fuel into mechanical energy. As shown in Figure 4, an increase of the compression ratio results in a rise of thermal efficiency under all load tests. In this work, the BTE value of the engine fueled POB is similar to that of the diesel at the compression ratio of 17 and 18. However,

in the compression ratio test at 16, the engine fueled by POB obtained a lower BTE value than diesel owing to the poor performance of POB spray at lower temperature in the combustion chamber. This condition results in the lower cetane value of using POB than diesel due to the presence of inconsistent combustion.

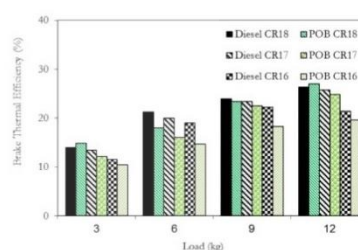


Figure 4 Variation of brake thermal efficiency (BTE) with load.

### 3.1.3 Exhaust temperature

As illustrated in Figure 5, the exhaust temperature of the tested engine obtained the higher value with an increase of the load, which relates to the higher brake power under increasing the compression ratio condition. The engine fueled by POB comparing with diesel presents a few higher exhaust temperature values from the POB test than diesel test under the load test at 3 and 6 kg. On the other hand, at the load test at 9 and 12 kg, the exhaust temperature values from POB test provide more slightly decrease than diesel test as illustrated in Figure 5.

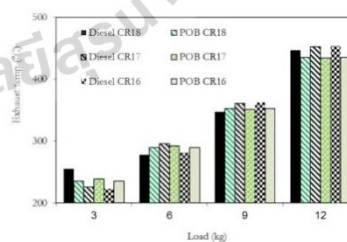
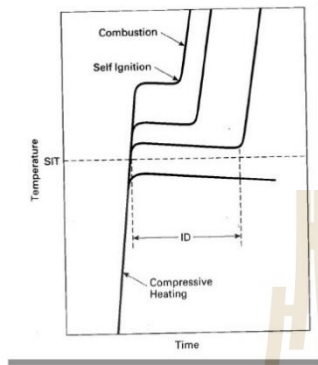


Figure 5 Exhaust temperature with load.



**Figure 6** Relationship between combustion temperature and ignition time.

In case of the fuel temperature higher than self-ignition temperature (SIT) as presented in Figure 6, the fuel is burnt after a period of ignition delay (ID). At the higher the temperature than the SIT, the ID range obtains the shorter time with a few thousand parts of a second [12].

**3.2 Combustion characteristic**

The combustion characteristics examined, including the cylinder pressure and the heat release, which is derived from the equation (3), based on the First Law of Thermodynamics under hypothesis the polytropic process is shown in the equation 3

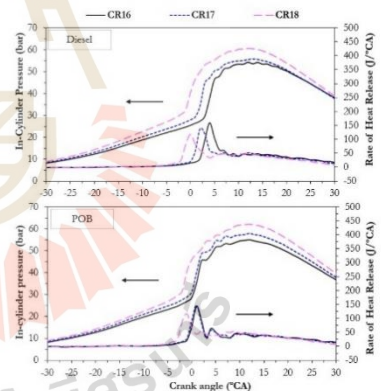
$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( P \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\gamma - 1} \left( V \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

where  $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$  is the amount of heat transfer rate (J/deg CA), V is the instantaneous volume (m<sup>3</sup>), P is cylinder pressure (N/m<sup>2</sup>) of the cylinder,  $\gamma$  is the

ratio of specific heats, and  $\theta$  is crank angle (deg) [13]

**3.2.1 Cylinder Pressure and Heat Release Rate**

Figure 7 shows the variation of cylinder pressure values and heat release rate with variable combustion ratio (VCR) from 16 to 18 under the variable crank angles at full load. It is found that the combustion ratio of 18 (CR18) for the engine tested by POB and diesel obtains the high cylinder pressure at stable crank angle due to high heat release, causing a good fuel evaporation rate [14]. In case of the engine tested by POB, the less shift of crank angle implies to the shorter ignition delay than diesel test. However, POB test affects fluctuation of the heat release rate due to its lower volatility and higher viscosity than diesel fuel. When the combustion ratio was adjusted at CR18, it is able to reduce this influence.



**Figure 7** Variation cylinder pressure and heat release rate at the crank angles under combustion ratio conditions comparing with diesel and POB conditions.

**3.3 Emission analysis**

**3.3.1 Oxide of Nitrogen Emissions (NO<sub>x</sub>)**



Nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) gas is the main exhaust components from engine combustion consisting of nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>). High combustion temperature is able to affect the rise of NO<sub>x</sub> emission due to the high possibility of nitrogen bonding with oxygen. The oxygenated nature of POB provides the slightly higher adiabatic flame temperature resulting in the better combustion complete than diesel test [15].

Figure 8 shows NO<sub>x</sub> emission with varying loads and combustion ratios for POB and diesel tests. It is noted that under all engine load tests, the effect of the decreased VCR of a reduction of NO<sub>x</sub> emission is found for the both of POB and diesel tests. NO<sub>x</sub> as double bonded molecules is brought to a slightly higher adiabatic flame temperature. Thus, the high combustion temperature has the effective influence directly from increasing VCR. Meanwhile, the high viscosity of POB and high flash point can cause the decay of fuel injection and subsequently affect an increase in NO<sub>x</sub> emission.

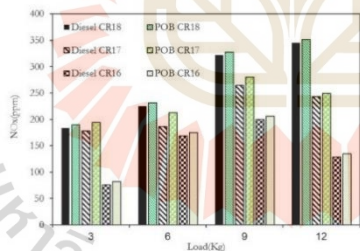


Figure 8 Variation NO<sub>x</sub> emission with loads under variable combustion ratios.

### 3.3.2 Carbon monoxide emissions (CO)

Carbon monoxide emissions are mostly dependent on the fuel properties, the amount of oxygen, the combination of air and fuel, temperature and turbulent airflow in the combustion chamber. CO emissions with

varying loads and combustion ratios for POB and diesel tests is shown in Figure 9. Comparing the CO emissions of biodiesel and diesel fuel, it is found the decrease of CO emission from POB test comparing with diesel test in all VCR and engine load conditions. It is mostly possible due to C-O bonds lightly occurring at combustion temperatures and its shorter ignition delay also results in better the complete fuel combustion [16]. Therefore, an increase in VCR relating to combustion temperatures is able to reduce CO emissions.

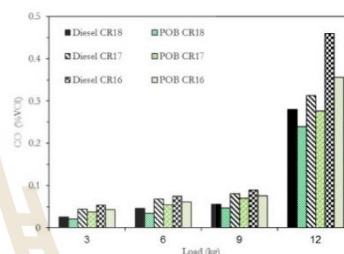
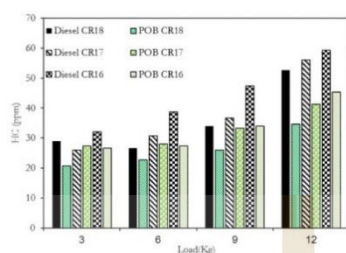


Figure 9 Variation CO emission with loads under variable combustion ratios.

### 3.3.4 Hydrocarbon emissions (HC)

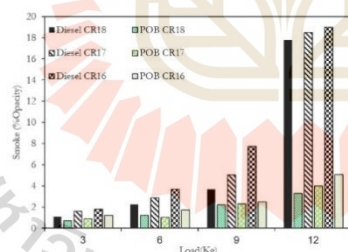
Hydrocarbon micro-particles are an organic compound that is able to cause incomplete fuel combustion. Figure 10 shows HC emissions from the engine fueled by POB and diesel fuel at various loads and VCR conditions. The results of decreased HC micro-particles significantly indicate the fuel combustion efficiency due to its oxygenated nature of POB leading to the effectively complete combustion. It is consistent with the availability of oxygen atom in biodiesel [17]. Meanwhile, the increase in VCR is able to provide the reduction of HC emissions owing to the higher combustion temperature and the shorter ignition delay.



**Figure 10** Variation HC emission with loads under variable combustion ratios.

### 3.3.5 Smoke emissions

The main cause of smoke formation is from the incomplete combustion of the hydrocarbon in fossil fuel due to the chemical reaction of carbon component. Smoke emission has directly related to with the results of CO and HIC emissions. The POB test results present more effective decrease of smoke emissions than diesel test. The smoke emission generally increases with the increase in the load tests as shown in Figure 11 due to the rich fuel mixture but VCR increases with the decrease of smoke emission.



**Figure 11** Variation smoke opacity with loads under variable combustion ratios.

## 4. CONCLUSIONS

The engine performance and emission characteristics were verified under the tests of VCR for the engine fueled by using POB and diesel.

- An increase in brake specific fuel consumption less than 20% at CR 16 has been found by using POB at all load tests comparing with diesel test.

- The brake thermal efficiency of the POB test at CR18 provided the increase by 2.04%, compared with diesel test.

- HC, CO and smoke emissions reduced by 25.36%, 17.60%, and 16.39%, respectively at CR 18, whereas NO<sub>x</sub> emission increased by 51.02%, compared with diesel test.

- The slightly higher viscosity and lower volatility of POB resulted in the lower ignition delay of the engine test. The ignition delay decreased involved with the change of crank angle about 4 degrees when CR was increased from 16 to 18.

- Finally, an increase in VCR at CR18 is able to improve improved the performance, combustion efficiency for using both POB and diesel tests.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by Suranaree University of Technology and National Research Council of Thailand.

## REFERENCES

- [1] R. Karthikeyan, and N. V. Mahalakshmi, Performance and emission characteristics of a turpentine diesel fuel engine Energy, 32 (2005), pp. 1202-1209
- [2] N.L. Panwar, Y. Shirame Hemant, N. S. Rathore, Jindal Sudhakar, and A. K. Kurchania, Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil Appl. Therm. Eng., 30 (2010), pp. 245-249
- [3] Nagarajan, Mahua (Madhuca indica) Seed oil : a source of renewable energy in india,

- Journal of Scientific and Industrial Research., 64 (2005), pp. 890-896.
- [4] A. Demirbas, " Global biofuel strategies. Energy Education Science Technology.", 17: pp. 27-63.
- [5] N. Alkabbashi, Md Z. Alam, M.E. S. Mirghani and A.M.A. Al-Fusaiei, Biodiesel Production from Crude Palm Oil by Transesterification Process. Journal of Applied Sciences 2009;9: 3166-3170.
- [6] K. Fangsuwannarak and K. Triratanasrichai, Improvement of Palm Biodiesel Properties by Using Nano- TiO<sub>2</sub> Additive, Exhaust Emission and Engine Performance, The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, No. 43 (2013), pp. 111-118.
- [7] K. Fangsuwannarak and K. Triratanasrichai, Effect of Metalloid Compound and Bio-Solution Additives on Biodiesel Engine Performance and Exhaust Emissions, American Journal of Applied Sciences 10 (10): (2013), pp. 1201-1213.
- [8] M.G. Kulkarni, A.K. Dalai Waste cooking oil an economical source for biodiesel: a review Ind. Eng. Chem. Res., 45 (9) (2006), pp. 2901-2913
- [9] M. El-Adawy, A. Ibrahim, M. El-Kassaby, An experimental evaluation of using waste cooking oil biodiesel in a diesel engine, Energy Technol. 1 (12) (2013) 726-734.
- [10] A. Ibrahim, M. El-Adawy, M. El-Kassaby The impact of changing the compression ratio on the performance of an engine fueled by biodiesel blends Energy Technol., 1 (7) (2013), pp. 395-404
- [11] M. EL\_Kassaby, M.A. Nemit\_allah, Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel/diesel fuel, Alexandria Eng. J. 52 (1) (2013) 1-11.
- [12] TIZARD and PYE .Philosophical Magazine, July 1922.
- [13] Krishnamoorthi M, Malayalamurthi R. Experimental investigation on performance, emission behavior and exergy analysis of a variable compression ratio engine fueled with diesel-aegle-marmoles oil-diethyl ether blends. Energy 2017; 128:312-28.
- [14] Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. Waste Manage, vol. 51, pp. 91-96.
- [15] H. Raheman, S. V. Ghadge, Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing, Fuel 87 (2008) 2659-2666.
- [16] Pankaj Dubey, Rajesh Gupta. (2016). Study of the performance and emission characteristics for a dual fuel powered single cylinder diesel engine, Int. Automot. Mech. Eng. (IJAME). vol.13, pp.3373-3388.
- [17] Bora, B. J. and U. K. Saha (2016). " Experimental evaluation of a rice bran biodiesel-biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios." Renewable Energy 87: 782-790.
- [18] Dubey, P. and R. Gupta (2018). "Influences of dual bio-fuel ( Jatropha biodiesel and turpentine oil) on single cylinder variable compression ratio diesel engine." Renewable Energy 115: 1294-1302.

## Effect of Nano-TiO<sub>2</sub> Additives Blended in Palm Biodiesel on Compression Ignition Engine Performance

Karoon Fangsuwannarak, Thipwan Fangsuwannarak, and Yongsathon Khotbut

**Abstract**—The property improvement of palm oil biodiesel (POB) was investigated by mixing a nano-TiO<sub>2</sub> additive in order to achieve in the decrease of exhaust emissions of a diesel engine. The different POB fuel fractions were used including B10, B20, B30, B40, B50, and B100 which are compared with commercial diesel B2 as a fuel standard. The results suggested that the small amount of 0.1% wt nano-TiO<sub>2</sub> additive provided the property improvement such as a decrease in kinematic viscosity and an increase in flash point, cetane index, and heating values. However, there are B2+0.1%TiO<sub>2</sub> and B10+0.1%TiO<sub>2</sub> providing their properties to be accepted in ASTM standard. The experimental results suggested that engine power and torque increased during the range of low engine speed (<2500 rpm) and became decreased during the higher range of engine speed (>3000 rpm). Carbon oxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and nitric oxide (NO<sub>x</sub>) emissions were measured directly at the tailpipe in order to observe the effect of POB fuel used on the gas emissions. It was found that nano-TiO<sub>2</sub> additive significantly contributed the reduction of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions.

**Index Terms**—Palm biodiesel, nano-TiO<sub>2</sub> additives, compression ignition, engine performance.

### I. INTRODUCTION

In the present, environmental concerns increase due to decreasing fossil fuel and increasing ambient air pollution from gasoline engine in particular high-speed diesel engine. Biodiesel fuels can clearly provide positive environmental benefits because of one involvement of high oxygen content in biodiesel fuel to be biodegradable through antioxidant mechanism [1]. Biodiesel as an alternative fuel available for diesel engine is predominantly produced from virgin vegetable oil or animal fats through the chemical reactions to involve transesterification and esterification processes. In Thailand, palm oil biodiesel (POB) fuel is playing an important role on the bioenergy development due to having a massive energy plantation. The renewable and alternative energy development plan has set up the production target at 4.5 million liters/day in 15-year plan. Nevertheless, the massive palm feedstock has been concerned and managed for reducing adverse impact on the environment [2]. While biodiesel is becoming cost competitive with fossil fuels owing to the widespread availability of biomass resource [3], [4]. Meanwhile, previous studies presented that a decrease

in engine power relates to an increase in volume fraction of palm oil biodiesel (POB) [5], [6]. These causes lead to more studies to upgrade the fuel quality and engine performance as well as reduction of exhaust emissions without modifying diesel engine. In addition, there are many studies to focus on the improvement of POB properties by blending an effective additive in the optimal diesel fuel fraction [7]-[9]. While tailpipe emission from using POB fuel depend on the POB blend in diesel fuel used, the kind of additive used, and the type of engine. Nano-titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) additive is a kind of metal oxide materials to be claimed that it can improve solid propellant burn rates. It would result from the high surface-to-volume of the nanoparticles to provide a better catalyst than traditional additives [10]. However, the effect of nano-TiO<sub>2</sub> additive on exhaust emissions have not studied extensively in order to improve air quality. The demonstrations in this study were performed without any modifying engine.

This work studied the effect of nano-TiO<sub>2</sub> blend into palm biodiesel on the properties comparing with ASTM standard. Moreover, engine performance test was demonstrated on a FPS 2700 chassis dynamometer. Exhaust emissions such as NO<sub>x</sub>, CO and CO<sub>2</sub> from operation of an indirect injection pick-up diesel engine were studied under SAE J816B standard. The exhaust emission results were presented.

### II. EXPERIMENTAL PROCEDURES

#### A. Preparation of Palm Oil Biodiesel

In this study, the POB fuel mixtures of purified palm oil and premium diesel oil were measured to verify their properties. The various fractions of palm fuel in diesel were investigated including 2%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, and 100% palm biodiesel with the rest of diesel fuel fraction denoted as B2, B10, B20, B30, B40, B50, and B100, respectively. In this experiment, small amount of nano-TiO<sub>2</sub> of 0.1% by weight was used as a catalyst. The properties of the tested fuel were measured including kinematic viscosity, flash point, cetane index, and heating values. The experimental results were compared with the properties of B2 to be a commercial POB diesel. The composed POB fuel from the mixture of purified palm oil, premium diesel, and 0.1%wt nano TiO<sub>2</sub> additive was blended by means of an ultrasonic shaker for 15 minutes in order to provide the uniform suspension.

#### B. Engine Performance Testing

The used vehicle in this experiment was a standard pickup car with a manual gear box. The schematic of the experiment setup is depicted in Fig. 1.

Manuscript received January 9, 2020; revise March 31, 2020.

K. Fangsuwannarak and Y. Khotbut are with School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand (e-mail: karoon@sut.ac.th).

T. Fangsuwannarak is with School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

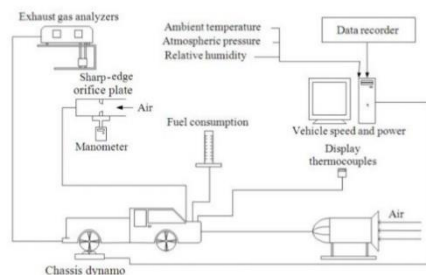


Fig. 1. Schematic of experiment set up.

The tested engine specifications were listed in Table I. The FPS 2700 chasis dynamometer under the simulation of road load conditions with eddy current brake was conducted in this experiment. Measuring accuracy of the chasis dynamometer is of  $\pm 2\%$ . The performance correction was used by following a standard of SAE J. 1349. The accuracy of wheel power of  $\pm 3\%$  was obtained. Fuel consumption system was set up and coupled with the fuel pump in order to examine the amount of fuel consumption. Each engine test was repeated 3 times to ensure the average data calculation for the analysis. Owing to the different fuels tested, each engine test was on a standard of the operating conditions.

TABLE I: SPECIFICATIONS OF THE TESTED ENGINE

Engine	TD27(New)
Displacement	2663 cc
Bore x Stroke	96.0 X 92.0 mm
Cooling system	Water cool
Intake Method	Natural aspiration
Maximum Power	83.8 bhp@4000rpm
Maximum Torque	166Nm@2200rpm

### C. Exhaust Emission Testing

According to SAE J816B specifications, exhaust emissions were measured by a Testo 350 gas analyzer. Measurement capacity for  $\text{NO}_x$ , CO, and  $\text{CO}_2$  is in the range of 0-500 ppm, 0-10,000 ppm, and 0-50% vol., respectively. Exhaust emissions were measured directly at tailpipe by the analyzer probe. The test cycle was repeated three times.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### A. Comparative Properties of POB Fuels

The aim of using additive is to improve the quality of POB fuel blend in order to possibly further use the less diesel. The properties of the different POB fuels showed the measured results to involve their identity quality in Table II. The results suggested that small amount of nano- $\text{TiO}_2$  of 0.1%wt provides the significant improvement of the fuel quality to compare with different POB fuel blends with no additive. It is noted that nano- $\text{TiO}_2$  contributed to increase flash point, cetane index and heating value, in addition, to reduce kinematic viscosity of POB fuels. Therefore, the data obtained from testing POB fuels belongs to the ASTM standards for B2, B10, B30, and B40 with dosing nano- $\text{TiO}_2$ .

TABLE II: COMPARATIVE PROPERTIES OF POB FUELS

Fuel	Kinematic Viscosity (cSt)	Flash point (°C)	Cetane index	Heating value (MJ/kg)
ASTM Standard	ASTM D445 1.8-4.1	ASTM D93 > 52	ASTM D976 > 50	ASTM D240 > 42.5
B2	3.92	66	56.87	44.39
B10	4.02	65	55.99	43.79
B20	4.11	70	56.92	43.64
B30	4.16	85	56.30	37.25
B40	4.38	83	56.53	37.40
B50	4.52	90	55.22	38.22
B100	5.46	135	49.04	37.62
B2+0.1%	3.64	76	57.05	42.74
B10+0.1%	3.80	74	57.36	41.69
B20+0.1%	4.05	70	57.07	40.48
B30+0.1%	4.16	84	56.58	44.32
B40+0.1%	4.34	80	55.91	43.12
B50+0.1%	4.38	82	54.90	40.41
B100+0.1%	5.34	150	49.55	39.80

### B. Comparative Engine Performance

Fig. 2 shows the engine power from using different POB fuel blend to be dosed by nano- $\text{TiO}_2$  additive. All tests provided the maximum power at engine speed of 4000 rpm. It was found that the increased trend of the power for POB fuel mixing the additive is similar to B2. Almost all the POB fuels mixing the additive provided the small increase of power at the range of low engine speed ( $< 2500$  rpm) comparing with B2 but the measured power became lower at the range of higher engine speed ( $> 3000$  rpm.) It is mostly possible due to that the properties of heating value and cetane index of POB fuel were improved from the blend of nano- $\text{TiO}_2$  additive.

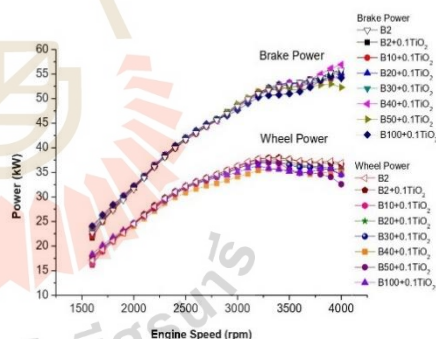


Fig. 2. Power of the engine to consume the different POB fuel blends comparing with B2.

Fig. 3 presents the torque of engine operation with different POB fuel used. The maximum torque is 166 Nm at engine speed of 2200 rpm. Similarly, torque curve for POB fuels does by additive showed the similarity trend comparing with B2 used. It was seen that engine torque increased at the range of low engine speed ( $< 2500$  rpm.) comparing with B2. On the other hand, engine torque values decrease when the engine operates at the range of higher engine speed ( $> 3000$  rpm).

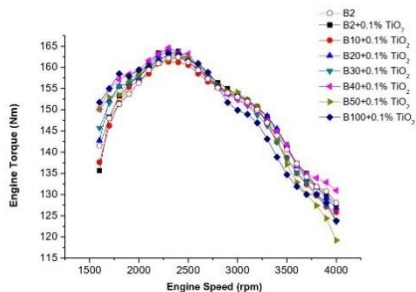


Fig. 3. Torque of the engine to consume the different POB fuel blends comparing with B2.

C. Exhaust Gas Emissions

Carbon oxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and nitric oxide (NO<sub>x</sub>) emissions were directly measured during the engine was operating at 1500, 2000, 2500, and 3000 rpm in order to observe the variation of exhaust gas emissions. The comparison of CO results of POB fuel blend with additive used and B2 used was illustrated in Fig. 4. The results showed that the CO emission quantity significantly reduced at higher engine speed (2500-3000 rpm.) in particular B10+0.1%, B20+0.1%, and B30+0.1%TiO<sub>2</sub>. The main cause would be from the increase of oxygen composition in vegetable oil to result in more completely internal combustion in the engine and then lead to obviously reduction of CO emission [4], [9]. At low engine speed of 1500 rpm., all POB fuel tests provided more CO emission results than used B2 except using B2+0.1%TiO<sub>2</sub> that obviously reduced CO emission. Thus, 0.1% nano-TiO<sub>2</sub> in the optimal POB fuel blend is a very effective use of CO reduction for a high speed engine due to that nano-TiO<sub>2</sub> acts as an oxidation catalyst.

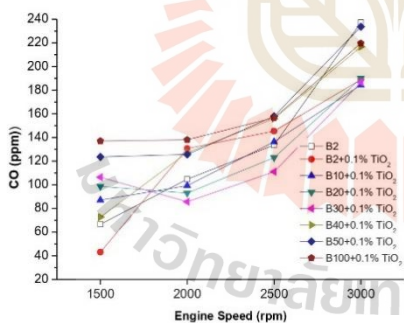


Fig. 4. Variation of CO emission for different POB fuels with mixing 0.1%wt nano-TiO<sub>2</sub> comparing with B2 standard fuel.

Fig. 5 shows the effective decrease of CO<sub>2</sub> emission during engine operation at 1500 – 3000 rpm. The results suggested that the maximum CO<sub>2</sub> reduction at 1500 rpm is by 23%, 33%, and 43% for B10+0.1%, B20+0.1%, and B30+0.1%TiO<sub>2</sub>, respectively, that compared with B2. Meanwhile, at 3000 rpm, the CO<sub>2</sub> emission results for B10+0.1%, B20+0.1%, and B30+0.1%TiO<sub>2</sub> comparing

with B2 provided the decreased values by 11%, 14%, and 21%, respectively.

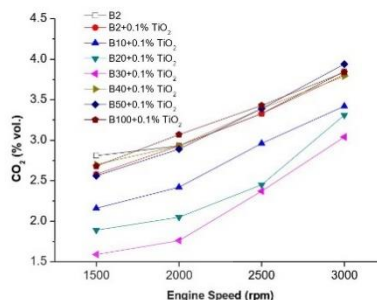


Fig 5. Variation of CO<sub>2</sub> emission for different POB fuels with 0.1%wt nano-TiO<sub>2</sub> additive comparing with B2 standard fuel.

NO<sub>x</sub> emission can affect directly the corrosive in engine system. The variation of NO<sub>x</sub> emission under engine operation using the POB fuels was measured at the different speeds and provided the results as depicted in the Fig. 6. It was found that almost all the POB fuels with mixing nano-TiO<sub>2</sub> additive provided the effective reduction of NO<sub>x</sub> emission throughout the speed range, whereas B2+0.1%TiO<sub>2</sub> fuel contribute the increase of NO<sub>x</sub> in the range of engine speed at 2500 – 3000 rpm. It may occur the feature of the inappropriate mixture of air and the fuel during combustion at higher engine speed. The maximum NO<sub>x</sub> reduction was obtained from using B30+0.1%TiO<sub>2</sub> by 61%, 49%, 29%, and 17% at 1500, 2000, 2500, and 3000 rpm, respectively, that compared with B2.

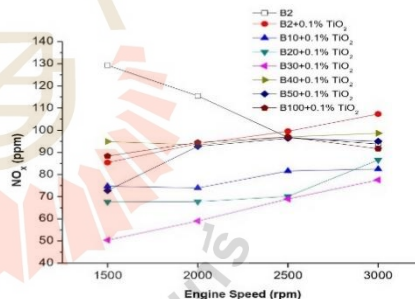


Fig 6. Variation of NO<sub>x</sub> emission for different POB fuels with 0.1%wt nano-TiO<sub>2</sub> additive comparing with B2 standard fuel.

IV. CONCLUSIONS

The quality improvements of palm oil biodiesel fuel were investigated in order to compensate the diesel fuel consumed increasingly. There is not only the use of an alternative POB fuel for above reason but the POB fuel also contributes the reduction of gas emissions. In this work, we studied the effect of nano-TiO<sub>2</sub> additive mixed in the different POB fuel fractions on the performance of an indirect injection diesel engine and exhaust emissions. The results suggested that POB fuel properties were improved by

nano-TiO<sub>2</sub> additive as a catalyst. The improved properties of the POB fuels related to the improvement of engine power and torque that provided the similarity of the results from using B2. Meanwhile, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions for B30+0.1%TiO<sub>2</sub> extremely reduced by 43% and 61%, respectively at the engine speed of 1500 rpm that compared with the results for B2. While, the engine operated at 3000 rpm, then B30+0.1%TiO<sub>2</sub> provided CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions reduced by 21% and 17%, respectively.

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

Dr. Karoon Fangsuwannarak conducted the research; Mr. Khotbut, Dr. Karoon Fangsuwannarak and Dr. Thipwan Fangsuwannarak analyzed the data; Dr. Karoon Fangsuwannarak and Dr. Thipwan Fangsuwannarak wrote the paper; all authors had approved the final version.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

#### REFERECES

- [1] A. Demirbas, "Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines," Springer-Verlag London limited, ISBN: 978-1-84628-994-1, 2008.
- [2] S. Sampattagul *et al.*, "Life cycle assessment of palm oil biodiesel production in Thailand," *International Journal of Renewable Energy*, vol. 6, no. 1, 2011.
- [3] N. Alkabbashi, M. Z. Alam, M. F. S. Mirghani, and A. M. A. Al-Fusaiel, "Biodiesel production from crude palm oil by transesterification process," *Journal of Applied Sciences*, 2009.
- [4] J. B. Nduwayezu, T. Ishimwe, A. Niyibizi, and A. Munyentwali, "Biodiesel production from unrefined palm oil on pilot plant scale," *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 2015.
- [5] M. A. Kalam and H. H. Masjuki, "Testing palm biodiesel and NPAA additives to control NOx and CO while improving efficiency in diesel engines," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, 2008.
- [6] M. Guru *et al.*, "Biodiesel production from waste animal fat and improvement of its characteristics by synthesized nickel and magnesium additive," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, 2009.
- [7] G. R. Kannan *et al.*, "Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel," *Applied Energy*, vol. 88, 2011.
- [8] A. Selvaganapathy, B. Sundar, Kumaragurubaran, and P. Gopal, "An experimental investigation to study the effects of various nano particles with diesel on DI diesel engine," *ARPJ Journal of Science and Technology*, 2013.
- [9] S. Karthikeyan, A. Elango and A. Prathima, "Performance and emission study on zinc oxide nano particles addition with pomolion stearin wax biodiesel of CI engine," *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2014.
- [10] United States Patent Application Publication Hussain *et al.*, Patent No. UA 2011/0209389 A1, 2011.

Copyright © 2020 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).



**K. Fangsuwannarak** was born in Surin, Thailand in 1970. He received the B. Eng. degree in mechanical engineering from Vongchalitkul University and M. Eng. and Ph.D. degree in mechanical engineering from Khon Kean University, Thailand, in 2014.

From 2008 to 2019, he has been an assistant professor with the mechanical engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His research interests include internal combustion engine, automotive engineering, alternative energy and heat transfer.

## ประวัติผู้เขียน

นายยงศธร โคตบุตร เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2538 ที่อำเภอเมือง จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนเลยพิทยาคม จังหวัดเลย ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา 2559 หลังจากสำเร็จการศึกษาก็ได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลเพื่อพัฒนาความรู้ของตนเองจึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 โดยระหว่างการศึกษาได้มีโอกาสเป็นผู้สอนรายวิชาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้แก่ ปฏิบัติการทาง พลศาสตร์และระบบควบคุมในยานยนต์ ปฏิบัติการระบบในยานยนต์ ปฏิบัติการทางการผลิตและระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงงาน ปฏิบัติการด้านความร้อนและของไหลสำหรับยานยนต์ และปฏิบัติการวัสดุคอมโพสิตในวิชาวัสดุอากาศยาน

ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้มีทักษะและความรู้ที่ได้จากการสอนมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้วิจัยและวิจัยร่วมกับคณาจารย์จนมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ ผลงานที่เป็นเอกสารฉบับเต็ม (Full paper) ในเอกสารการประชุมวิชาการ (Proceeding) ระดับชาติ จำนวน 4 เรื่อง ระดับนานาชาติ 2 เรื่อง และเผยแพร่ผลงานในวารสารระดับนานาชาติ จำนวน 1 เรื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี