

การศึกษาเชิงทดลองและการหาค่าเหมาะสมที่สุดของผลกระทบของน้ำมัน
ดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และ ไบโอดีเซล: คุณลักษณะมลพิษและการสึกหรอ
ของเครื่องยนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

EXPERIMENTAL AND OPTIMIZATION STUDY ON THE EFFECT OF
BIO-HYDROGENATED DIESEL AND BIODIESEL: EMISSION
CHARACTERISTICS AND WEAR OF ENGINES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechatronics Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

การศึกษาเชิงทดลองและการหาค่าเหมาะสมที่สุดของผลกระทบของน้ำมันดีเซล
ชีวภาพสังเคราะห์และไบโอดีเซล: คุณลักษณะมลพิษและการสึกหรอของเครื่องยนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กัมปนาท เทียนน้อย)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.เอกรงค์ สุขจิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีธผล)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ธีทัต ดลวิชัย)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ไชยธร ธรรมแท้)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นิติ กลิ่นแก้ว : การศึกษาเชิงทดลองและการหาค่าเหมาะสมที่สุดของผลกระทบของน้ำมัน
ดีเซลชีวภาพสังเคราะห์และไบโอดีเซล: คุณลักษณะมลพิษและการสึกหรอของเครื่องยนต์
(EXPERIMENTAL AND OPTIMIZATION STUDY ON THE EFFECT OF BIO-
HYDROGENATED DIESEL AND BIODIESEL: EMISSION CHARACTERISTICS AND
WEAR OF ENGINES)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต, 235 หน้า

คำสำคัญ: น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์/ไบโอดีเซล/สมรรถนะเครื่องยนต์/การปล่อยมลพิษ/การ
เผาไหม้/การสึกหรอของเครื่องยนต์/การหาค่าที่เหมาะสม/ปัญหาประดิษฐ์

Bio-Hydrogenated Diesel (BHD) ในบางประเทศจะเรียกว่า Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) ถูกผลิตจากไขมันพืชหรือไขมันสัตว์นำมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงโดยมีโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า Hydro-Processing น้ำมันที่ได้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมอยู่ระหว่าง C12-C22 องค์ประกอบอะตอมจะเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงที่แตกต่างกัน กระบวนการนี้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิง เช่น ซีเทนนิมเบอร์, จุดน้ำมันเป็นฝ้า และจุดเยือกแข็ง เป็นต้น การนำน้ำมัน BHD มาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงยังมีข้อเสียในเรื่องของค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะที่ยังต่ำกว่าเกณฑ์คุณสมบัติน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดกรมธุรกิจพลังงาน อีกทั้งคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน BHD มีค่าที่ต่ำซึ่งจะส่งผลต่อความเสียหายแก่ระบบปั๊มเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันผสม BHD โดยการเติมไบโอดีเซลจากปาล์มที่สัดส่วนต่าง ๆ ตรวจสอบค่าคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสีย และคุณสมบัติการหล่อลื่น นำผลทดสอบที่ได้มาทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าอัตราส่วนปาล์มไบโอดีเซลที่เหมาะสมที่สุดและนำไปทดสอบระยะยาวกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว การผสมน้ำมันไบโอดีเซลสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการหล่อลื่นที่สูญเสียไปของน้ำมัน BHD ได้โดยการเติมไบโอดีเซลเพียง 5% ส่งผลต่อการลดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอของน้ำมัน BHD ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน และการเติมไบโอดีเซลมากกว่า 10% ขึ้นไปค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการสึกหรอไม่มีความแตกต่างกัน ผลการทำนายของแบบจำลอง Generalized regression neural networks (GRNNs) แสดงค่าประสิทธิภาพที่สูง ในการทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (Coefficient of determination, R^2) และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error, MAPE (%)) เท่ากับ 0.996 และ 0.645% ตามลำดับ และในกรณีของการปล่อยมลพิษมีค่าเท่ากับ 0.981 และ 4.45%

การทดสอบระยะยาวในเครื่องยนต์พบว่า น้ำมัน BHD มีการสึกหรอของเครื่องยนต์มากกว่า น้ำมันดีเซลโดยมีปริมาณอนุภาคเหล็กในน้ำมันเครื่องและการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ สูงกว่า น้ำมัน BHD 90% ที่เติมด้วยไบโอดีเซล 10% (BHD90) มีการสึกหรอของเครื่องยนต์น้อยที่สุด ซึ่งดีกว่าทั้ง น้ำมัน BHD และน้ำมันดีเซลเมื่อพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ศึกษา เช่น การสึกหรอของปลอกสูบและ ระยะห่างของลูกสูบ



สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

NITI KLINKAEW : EXPERIMENTAL AND OPTIMIZATION STUDY ON THE EFFECT OF BIO-HYDROGENATED DIESEL AND BIODIESEL: EMISSION CHARACTERISTICS AND WEAR OF ENGINES.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. EKARONG SUKJIT, Ph.D., 235 PP.

Keywords: Bio-Hydrogenated Diesel/Biodiesel/Engine Performance/Emission/Combustion/Engine Wear/Optimization/Artificial Intelligence

Bio-Hydrogenated Diesel (BHD), also known as Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), is produced by reacting vegetable oil or animal fats with hydrogen under high temperature and pressure with a metal catalyst called Hydro-Processing. This process results in fuel with carbon atoms ranging from C12 to C22, improving properties like cetane number, Cloud Point, and freezing point. However, BHD's lower density, specific gravity, and limited lubricating properties pose challenges for direct diesel engine use, potentially causing damage to the fuel pump system. This research investigates enhancing BHD properties by blending it with palm biodiesel at various ratios. Tests evaluated the blended fuel's physical and chemical properties, engine performance, combustion characteristics, exhaust emissions, and lubricating properties. Results were then used to develop a mathematical model predicting the optimal biodiesel blend ratio, tested on a single-cylinder diesel engine for long-term effects. Blending biodiesel restores BHD's lubricating properties, with just 5% biodiesel sufficient to meet the wear standards prescribed by the Department of Energy Business and blends over 10%, showing minimal additional wear reduction. Prediction metrics demonstrated high model accuracy with generalized regression neural networks (GRNNs), achieving an average coefficient of determination (R^2) and mean absolute percentage error (MAPE) (%) of 0.996 and 0.645% for engine performance and 0.981 and 4.45% for emissions.

Long-term engine testing revealed that BHD fuel caused more engine wear than diesel, with higher iron particles in lube oil and less wear of various engine components. 90% BHD is blended with 10% biodiesel (BHD90) showed the least engine wear, performing better than BHD and diesel in several wear factors studied, such as cylinder liner wear and piston clearance.



School of Mechatronics Engineering
Academic Year 2024

Student's Signature
Advisor's Signature

[Handwritten signatures in blue ink]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับโอกาสและความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรงค์ สุขจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย แนววิธีการคิด ตลอดจนวิธีการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริมผล ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.อรรถสิทธิ์ เวียงคำ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในงานด้านปัญญาประดิษฐ์ และการหาค่าที่เหมาะสม

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยให้สำเร็จลงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมืออุปกรณ์ รวมถึงให้ใช้สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเครื่องยนต์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำอาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำอาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับสถานที่ในการทำการทดสอบเครื่องยนต์อัตราส่วนการอัดแปรผัน และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ที่คอยให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอยสนับสนุนให้งานวิจัยผ่านไปด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้ทำวิจัย ที่คอยอบรม เลี้ยงดูแล และสนับสนุนให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

นิติ กลิ่นแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาทางวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง.....	5
2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG).....	5
2.1.2 ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity)	5
2.1.3 จุดวาบไฟ (Flash Point).....	5
2.1.4 จุดไหลเท (Pour Point).....	5
2.1.5 ปริมาณกำมะถัน (Sulphur Content)	6
2.1.6 การกลั่น (Distillation).....	6
2.1.7 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion).....	6
2.1.8 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment).....	7
2.1.9 กากถ่านหรือคาร์บอน (Carbon Residue).....	7
2.1.10 ปริมาณเถ้า (Ash)	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.11 สี (Color)	7
2.1.12 ตัวเลขซีเทนและดัชนีซีเทน (Cetane Number และ Cetane Index).....	8
2.1.13 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value: HV)	8
2.1.14 คุณสมบัติการหล่อลื่น (Lubricity)	9
2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง	10
2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์	13
2.3.1 แรงบิด	13
2.3.2 กำลังเบรค.....	14
2.3.3 ความดันยังผลเฉลี่ย.....	14
2.3.4 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	15
2.3.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	16
2.3.6 ความดันในกระบอกสูบ	16
2.3.7 อัตราการปลดปล่อยความร้อน	17
2.3.8 การวิเคราะห์ความเสียหาย	17
2.4 การหล่อลื่นในเครื่องยนต์ดีเซล	19
2.4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น.....	20
2.4.2 วิธีการทดสอบและคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	21
2.5 ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump).....	26
2.5.1 หลักการพื้นฐานในการทดสอบปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	26
2.5.2 ความสูญเสียในระบบท่อ.....	29
2.6 ปาล์มไบโอดีเซล.....	34
2.7 Bio-Hydrogenated Diesel (BHD).....	36
2.8 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและปัญหาประดิษฐ์	39
2.8.1 การหาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์โดยใช้ Generalized Regression Neural Networks (GRNNs).....	41
2.8.2 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง GRNNs	43
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	กรอบการดำเนินงานวิจัย	48
3.2	การตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง	49
3.2.1	ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพียู	49
3.2.2	ความหนืดจลนศาสตร์	50
3.2.3	การกลั่น	50
3.2.4	จุดวาบไฟ	50
3.2.5	ดัชนีซีเทน	50
3.2.6	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	51
3.2.7	ความสามารถในการหล่อลื่น	52
3.3	การติดตั้งและการทดสอบเครื่องยนต์	52
3.3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ	54
3.3.2	ขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์	62
3.4	การหาแบบจำลองด้วยปัญญาประดิษฐ์และการหาค่าที่เหมาะสม	68
3.4.1	กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรอินพุต	67
3.4.2	การใช้ GRNNs หาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์	68
3.4.3	การหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์	68
4	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์ และการปรับปรุงค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิงโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซล	71
4.1	คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์	71
4.2	คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมไบโอดีเซล	74
5	ผลการทดลองและการวิเคราะห์สมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย ...	77
5.1	การทดสอบเครื่องยนต์ระยะสั้น	77
5.1.1	สมรรถนะเครื่องยนต์	77
5.1.2	คุณลักษณะการเผาไหม้	83
5.1.3	มลพิษไอเสีย	88
6	ผลการทำนายโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.1	การหาผลกระทบของตัวแปรอินพุตต่อตัวแปรเอาต์พุต	99
6.2	ผลลัพธ์และการอภิปราย	100
6.3	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของน้ำมันและเครื่องยนต์ต่อ ประสิทธิภาพและการปล่อยมลพิษ	102
7	ผลการทดสอบระยะยาว	108
7.1	ผลการทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาว	108
7.2	การทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ	108
7.3	การตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น	111
7.4	ผลการใช้น้ำมันและการวัดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์	121
7.5	ภาพถ่ายลูกสูบ	125
7.6	ภาพถ่ายฝาสูบ	125
7.7	ภาพถ่ายหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง	125
7.8	ภาพถ่ายวาล์วไอดีและวาล์วไอเสีย	125
8	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	130
8.1	สรุปผลงานวิจัย	130
8.2	ข้อเสนอแนะ	132
	รายการอ้างอิง	134
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์	143
	ภาคผนวก ข ผลการตรวจวัดมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์	147
	ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดสอบคุณลักษณะการเผาไหม้	154
	ภาคผนวก ง ผลการตรวจวัดแรงบิดก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวของ เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวระบายความร้อนด้วยอากาศ	158
	ภาคผนวก จ ผลการตรวจคุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล	161
	ภาคผนวก ฉ ผลการตรวจคุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD	163
	ภาคผนวก ช ผลการตรวจคุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD90	165
	ภาคผนวก ซ คำนวณน้ำหนักและระยะห่างของช่องว่างชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล	167

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฉ	ค่าน้ำหนักและระยะห่างของช่องว่างขึ้นส่วนในเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมัน BHD.....	175
ภาคผนวก ช	ค่าน้ำหนักและระยะห่างของช่องว่างขึ้นส่วนในเครื่องยนต์ ที่ใช้น้ำมัน BHD90.....	184
ภาคผนวก ฎ	การคำนวณเหตุการณ์สูญเสีย	193
ภาคผนวก ฐ	การเขียนโปรแกรมแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์และการหาค่าที่เหมาะสม ..	197
ภาคผนวก ฉ	ความล่าช้าในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันชนิดแตกต่างกัน.....	224
ภาคผนวก ด	ความล่าช้าในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน	226
ภาคผนวก ต	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	230
ประวัติผู้เขียน		235



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดลักษณะคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันตามกรมธุรกิจพลังงาน 11
2.2	โลหะสีกหรือที่สามารถพบได้ในเครื่องยนต์..... 24
2.3	ค่าความขรุขระของผิวท่อในเชิงพาณิชย์..... 33
3.1	เงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่น 52
3.2	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซล Kawama 186 F 54
3.3	ข้อมูลไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำในการเบรก 56
3.4	ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 57
3.5	ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควันดำ Horiba MEXA-600S 58
3.6	ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้..... 59
3.7	รายละเอียดปั้มน้ำแบบหอยโข่ง 60
3.8	ข้อมูลการทดสอบปั้มของเครื่องยนต์ Kawama 186F ที่ใช้ในการทดสอบ 61
4.1	คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง..... 72
4.2	คุณสมบัติของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล 73
6.1	ผลคำตอบของ RVEA Many-Objective optimization 105
6.2	การทำ Normalize เพื่อหาคะแนนรวมที่ดีที่สุด..... 106
6.3	การทำ Normalize เพื่อหาคะแนนรวมที่ดีที่สุดในแง่มุมของ Performance, Emission และ NOx-Smoke..... 107
7.1	กำลังอัดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด 111
7.2	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กหลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด 112
7.3	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กหลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด 113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.4	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด113
7.5	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่หลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด114
7.6	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่หลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด115
7.7	อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่หลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด115
7.8	ค่า PQ-Index และค่าอนุภาคหลักขนาดเล็ก, ขนาดใหญ่ในน้ำมันเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแต่ละชนิด117
7.9	สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันผสม.....118
7.10	สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันผสม119
7.11	สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันผสม119
7.12	สิ่งเจือปนสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง120
7.13	สิ่งเจือปนสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง121
7.14	สิ่งเจือปนสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง121
7.15	ผลต่างการวัดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน.....122
7.16	ผลต่างการวัดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล123
7.17	ผลต่างการชั่งน้ำหนักของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแต่ละชนิด124
7.18	ผลต่างการวัดชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล.....124
7.19	ภาพถ่ายลูกสูบหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง.....126
7.20	ภาพถ่ายฝาสูบหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง.....127
7.21	ภาพถ่ายหัวฉีดหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง.....128
7.22	ภาพถ่ายวาล์วไอดีและไอเสียหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง129

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซล6
2.2	เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)..... 10
2.3	ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายในแต่ละประเภทของชิ้นงานทางกล 19
2.4	การออกแบบและการจัดวางปั้มน้ำเพื่อการทดสอบระยะยาวตามมาตรฐาน มอก. 2618-2557 27
2.5	แผนภาพการทำงานของ ML และ DL 40
2.6	แผนภาพความเกี่ยวพันกันระหว่าง AI, ML, และ DL..... 41
2.7	โครงสร้างของอัลกอริทึม Generalized Regression Neural Networks (GRNNs) 42
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 49
3.2	โนโมกราฟ (Nomograph) สำหรับการหาค่าดัชนีซีเทน..... 51
3.3	แรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ Kawama 186F..... 53
3.4	เครื่องยนต์ดีเซลหนึ่งสูบที่ใช้ทดสอบ 54
3.5	ไฮดรอลิคไดนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำในการเบรก..... 55
3.6	สมรรถนะของไฮดรอลิคไดนาโมมิเตอร์ 55
3.7	เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo350..... 56
3.8	เครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Horiba MEXA-600S 57
3.9	หน้าต่างโปรแกรมวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ 58
3.10	กราฟสมรรถนะปั้มน้ำของเครื่องยนต์ Kawama 186F..... 60
3.11	มาตรวัดน้ำและเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล 62
3.12	แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในเครื่องยนต์ 63
3.13	การตรวจวัดขนาดและชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์ 65
3.14	จุดทำงานระหว่างปั้มน้ำและระบบ..... 66
3.15	แผนภาพการทำงานระหว่างการทดลองและการหาค่าที่เหมาะสม 68
4.1	ค่าความหนืดและคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล 74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล 74
4.3	ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล 75
4.4	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล..... 75
4.5	ค่าจุลวามไฟของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล..... 77
4.6	ค่าอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล 77
5.1	การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรกในแต่ละน้ำมัน 79
5.2	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรกในแต่ละน้ำมัน..... 80
5.3	การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละน้ำมัน..... 82
5.4	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละน้ำมัน 83
5.5	ความดันในกระบอกสูบและคุณลักษณะการเผาไหม้เทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยงของแต่ละน้ำมันที่โหลดต่าง ๆ 84
5.6	ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน 85
5.7	ความดันในกระบอกสูบคุณลักษณะการเผาไหม้เทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยงของน้ำมัน BHD ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน..... 86
5.8	ความดันในกระบอกสูบคุณลักษณะการเผาไหม้เทียบกับองศาเพลลาข้อเหวี่ยงของน้ำมัน BHD ที่โหลดแตกต่างกัน..... 87
5.9	ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของน้ำมัน BHD ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน 88
5.10	การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับออกไซด์ของไนโตรเจนในแต่ละน้ำมัน 89
5.11	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบกับออกไซด์ของไนโตรเจนในแต่ละน้ำมัน..... 90
5.12	การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับไฮโดรคาร์บอนในแต่ละน้ำมัน 92
5.13	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบกับไฮโดรคาร์บอนในแต่ละน้ำมัน 93
5.14	การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในแต่ละน้ำมัน 95
5.15	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในแต่ละน้ำมัน 95
5.16	การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับควันดำในแต่ละน้ำมัน 97
5.17	การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบกับควันดำในแต่ละน้ำมัน 98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1	P-Value ในโปรแกรม ANOVA..... 100
6.2	ผลการทำนายตัวแปรเอาต์พุตสมรรถนะเครื่องยนต์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GRNNs เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง 101
6.3	ผลการทำนายตัวแปรเอาต์พุตมลพิษในเครื่องยนต์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GRNNs เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง 102
6.4	จำนวนเจนเนอร์เรชันการต่อการรู้เข้าของคำตอบของ RVEA Algorithm 103
6.5	Parallel Coordinates Plot ของอัลกอริทึม RVEA Objective Optimization 104
7.1	สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลก่อนทดสอบและหลังทดสอบ 108
7.2	สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD ก่อนทดสอบและหลังทดสอบ 109
7.3	สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD90 ก่อนทดสอบและหลังทดสอบ 109
7.4	เปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องยนต์ก่อนทดสอบและหลังทดสอบของน้ำมันแต่ละชนิด 110
7.5	การตรวจดูค่า PQ-Index ควบคู่กับวิธีการ ICP หรือ RDE 116
7.6	ระยะห่างระหว่างลูกสูบและปลอกสูบ 122



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

σ	=	Smoothing Parameter
IN_{EX}	=	Input จากภายนอกสำหรับการใช้ในการทำนาย ซึ่ง $IN_{EX} = [I_1, I_2, I_3]$
W_i	=	Weight of GRNNs
$IN_{TR,i}$	=	ข้อมูลจาก Training Data Sets ซึ่ง $IN_{TR,i} = [I_{1,i}, I_{2,i}, I_{3,i}]$
$\bar{O}_{EXP}$	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลอง
$\frac{dV}{d\theta}$	=	การเปลี่ยนแปลงปริมาตรกระบอกสูบที่ตำแหน่งข้อเหวี่ยงใด ๆ ($m^3/^\circ CA$)
η_b	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)
$\dot{m}_f$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/s)
$\frac{dQ}{d\theta}$	=	อัตราการปลดปล่อยความร้อนเทียบกับองศาเฟลาข้อเหวี่ยง ($J/^\circ CA$)
γ	=	อัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ (C_p / C_v)
ANN	=	ปัญญาประดิษฐ์แบบโครงข่าย (Artificial Neural Network)
ANOVA	=	Analysis of Variance
BHD	=	น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ 100%
BHD70	=	น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ 70% ผสมไบโอดีเซล 30%
BHD80	=	น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ 80% ผสมไบโอดีเซล 20%
BHD90	=	น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ 90% ผสมไบโอดีเซล 10%
bmep	=	ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (kPa)
bsfc	=	อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรก (kg/kW·hr)
CO	=	มลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)
CR	=	อัตราส่วนการอัด
GRNNs	=	โครงข่ายประสาทเทียมการถดถอยทั่วไปสำหรับฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ (General Regression Neural Networks)
HC	=	มลพิษไฮโดรคาร์บอน (ppm)
h_d	=	เฮตทางด้านขาออกปั๊ม (m)
H_{fg}	=	เอนทัลปีของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
HHV	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง (kJ/kg)
h_L	=	เฮตความสูญเสียหลัก (m)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

h_m	=	เขตความสูญเสียรอง (m)
H_p	=	เขตปั๊ม (m)
HRR	=	Rate of Heat Release (J/°CA)
h_s	=	เขตทางด้านขาเข้าปั๊ม (m)
ICP	=	In-Cylinder Pressure (bar)
ICP-AES	=	วิธีการตรวจอนุภาคโลหะเหล็กขนาดเล็กกว่า 3 ไมครอน (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer)
LHV	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (kJ/kg)
MAPE	=	Mean Absolute Percentage Error (%)
N	=	ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM)
NO_x	=	มลพิษไนโตรเจนออกไซด์ (ppm)
n_R	=	จำนวนรอบการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยงที่ทำให้ได้กำลังต่อวัฏจักร
NSGA	=	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
$O_{i,EXP}$	=	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองลำดับที่ i
$O_{i,GRNNs}$	=	ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง GRNNs
$O_{TR, I, EXP}$	=	Output Factors ของการทดลอง
P	=	ความดันในห้องเผาไหม้ (bar)
P_b	=	กำลังเบรกเครื่องยนต์ (W)
PCP	=	Parallel Coordinate Plot
PQ index	=	อนุภาคโลหะเหล็กโดยรวมขนาดตั้งแต่ 2-1,000 ไมครอน
P-Value	=	ระดับนัยสำคัญในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ
Q_{HV}	=	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)
R^2	=	R-Square
RFS-AES	=	วิธีการตรวจอนุภาคโลหะเหล็กขนาด 5-100 ไมครอน (Rotrode Filter Spectroscopy-Atomic Emission Spectrometer)
RVEA	=	Reference Vector Guided Evolutionary Algorithm
S_D	=	Denominator Neuron
Smoke	=	มลพิษควันดำ (s^{-1})
S_N	=	Numerator Neuron
T	=	แรงบิด (N·m)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหางานวิจัย

วิกฤตการณ์ด้านพลังงานส่งผลต่อความผันผวนของราคาพลังงานในตลาดโลกทำให้ค่าครองชีพและราคาเชื้อเพลิงสูงขึ้น สำหรับประเทศที่ต้องพึ่งพาการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเป็นอย่างมากวิกฤตพลังงานจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญดังนั้นประเทศไทยจึงจำเป็นต้องเตรียมรับมือกับวิกฤตพลังงานโดยเน้นการใช้แหล่งพลังงานสะอาดหรือพลังงานทางเลือกที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศให้มากขึ้น โดยมีเป้าหมายหลักคือการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดความเสี่ยงและลดความผันผวนที่จะเกิดขึ้นตามแนวทางที่ระบุไว้ในแผนพัฒนาพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (Alternative Energy Development Plan 2018, AEDP2018) ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน ประเทศไทยมุ่งเน้นการส่งเสริมผลิตพลังงานโดยใช้ทรัพยากรหมุนเวียนที่มีอยู่ในประเทศให้เต็มศักยภาพ ทิศทางเชิงกลยุทธ์นี้มีความสำคัญต่อการผลักดันให้ประเทศมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนหรือลดการปล่อยคาร์บอนให้เท่ากับศูนย์และส่งเสริมผลิตพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 2561 [AEDP, 2018] ประเทศไทยมีเป้าหมายในการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกให้ได้ 30% ของพลังงานงานขั้นสุดท้าย ภายในปี พ.ศ. 2580 ในช่วงระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2565 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทน 9,917 ktoe เทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน 12.94% ของพลังงานขั้นสุดท้าย เมื่อเทียบกับช่วงเดือนเดียวกันในปี พ.ศ. 2564 มีอัตราการใช้งานเพิ่มขึ้น 7.8% โดยประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2565 มีปริมาณเท่ากับ 76,637 ktoe เทียบเท่าน้ำมันดิบ

เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ทดแทนหรือนำมาใช้ผสมเพื่อลดการใช้น้ำมันสำเร็จรูปอย่างน้ำมันดีเซลได้แก่กลุ่มเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างไบโอดีเซล ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคมปี พ.ศ. 2566 มีการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพเพิ่มขึ้น 8.7% เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2565 ในช่วงเดือนเดียวกันของปีก่อน ไบโอดีเซลที่นำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเป็นไบโอดีเซลที่ได้จากปาล์มซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของไทย หากนำปาล์มที่ผลิตได้มาทำไบโอดีเซลจนหมดจะทำให้เกิดความผันผวนของราคาน้ำมันพืชในตลาด การผลิตไบโอดีเซลเพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมจึงนำส่วนของผลผลิตที่เหลือจากการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกเป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งจะช่วยสร้างสมดุลระหว่างการนำผลผลิตทางการเกษตรไปผลิตอาหารและพลังงาน จากข้อมูลกระทรวงพลังงานในช่วง

เดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2565 มีการใช้ไบโอดีเซลจำนวน 1,065 ktoe เทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็น 1.39% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย

ปาล์มไบโอดีเซลที่ผลิตโดยผ่านกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน ไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาได้แก่กลีเซอรอลและสารประกอบเอสเทอร์ กรดไขมันในปาล์มเมทิลเอสเทอร์จะประกอบไปด้วยกรด Oleic Acid (C18:1) เท่ากับ 45.07 %wt และกรด Palmitic Acid (C16:0) เท่ากับ 36.93 %wt [Cherng-Yuan Lin, 2021] การนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ในส่วน 100% เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีบางประการยังเกินค่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน เช่น ค่าความหนืด, ค่าความหนาแน่น, ความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติการต้านทานการออกซิเดชัน จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล แต่การนำไบโอดีเซลมาผสมกับเชื้อเพลิงดีเซลจะช่วยให้เรื่องการลดมลพิษควันดำเนื่องจากในไบโอดีเซลมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีส่วนช่วยในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น

น้ำมันปาล์มนอกจากจะผลิตไบโอดีเซลได้แล้วยังสามารถผลิตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์หรือ Bio-Hydrogenated Diesel (BHD) ในบางประเทศจะเรียกว่า Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) ถูกผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์นำมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงโดยมีโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า Hydro-Processing น้ำมันที่ได้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมอยู่ระหว่าง C12-C22 [Anton A. Kiss, 2007] ซึ่งจัดอยู่ในสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวก Alkane หรือ Paraffin ในปัจจุบันการผลิต BHD ยังไม่เป็นที่นิยมมากเนื่องจากมีวิธีการผลิตที่ยาก ความต้องการตลาดโลกในปี 2009 BHD มีความต้องการ 2.5 Mton คิดเป็น 0.15% ของความต้องการพลังงานของโลก ซึ่งความต้องการพลังงานของโลกอยู่ที่ 1701 Mton [PTT, 2556] เนื่องจาก BHD เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวประเภท Alkane ลักษณะของพันธะจะเป็นโซ่ตรงทำให้มีจุดเดือดที่ต่ำ และมีคุณสมบัติทางเคมีที่ดีอยู่หลายประการ เช่น ค่า Cetane Index ที่สูง, มีความสามารถในการป้องกันการออกซิเดชันที่สูง, ไม่มีสารอะโรมาติกและมีซัลเฟอร์ที่ต่ำ [Farooqui et al, 2022]

Bio-Hydrogenated Diesel (BHD) หรือเรียกอีกอย่างว่า Green Diesel เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ผลิตได้จากกระบวนการ Hydro-Processing โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโลหะ จากวัตถุดิบชีวภาพซึ่งโดยปกติแล้วจะอุดมไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่ยังไม่อิ่มตัว การผลิต BHD นั้นจะนำไตรกลีเซอไรด์มาทำปฏิกิริยา Hydrogenation ไตรกลีเซอไรด์ที่ไม่อิ่มตัวจะจับตัวกับไฮโดรเจนกลายเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัวหรือมีชื่อเรียกว่า Hydrogenated Triglycerides ทำการแตกพันธะไตรกลีเซอไรด์ให้กลายเป็นกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, FFA) โดยกระบวนการ Hydrogenolysis หลังจากนั้นนำกรดไขมันอิสระมาทำปฏิกิริยา Hydrodeoxygenation เพื่อกำจัดออกซิเจนออก

ภายใต้แรงดันที่มีแก๊สไฮโดรเจนอยู่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบจำพวก Paraffin หรือเป็นสารในกลุ่ม n-alkane สารในกลุ่มนี้จะยังมีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นสายยาวจากนั้นนำมาปรับปรุงคุณสมบัติผ่านกระบวนการ Isomerization เปลี่ยน Alkane สายตรงให้กลายเป็น Alkane สายโซ่กิ่ง องค์ประกอบอะตอมจะเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงที่แตกต่างกัน กระบวนการนี้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงได้ เช่น Cetane Number, Cloud Point และ จุดเยือกแข็ง เป็นต้น การนำน้ำมัน BHD มาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงยังมีข้อเสียในเรื่องค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าเกณฑ์คุณสมบัติน้ำมันดีเซลตามข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน อีกทั้งคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน BHD ต่ำซึ่งจะส่งผลต่อความเสียหายแก่ระบบปั๊มเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ทั้งนี้คุณสมบัติที่ด้อยของน้ำมัน BHD จะสามารถชดเชยได้โดยการเติมไบโอดีเซลจากปาล์ม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมัน BHD ผสมไบโอดีเซลจากปาล์มที่สัดส่วนต่าง ๆ ตรวจสอบค่าคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ มลพิษไอเสีย และคุณสมบัติการหล่อลื่น นำผลทดสอบที่ได้มาทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายหาอัตราส่วนปาล์มไบโอดีเซลที่เหมาะสมที่สุดและนำไปทดสอบระยะยาวกับเครื่องยนต์ดีเซลดู

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (BHD) โดยการใช้ น้ำมันปาล์มไบโอดีเซล
- 1.2.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมัน BHD และ BHD ผสมปาล์มไบโอดีเซล
- 1.2.3 ประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องยนต์รวมถึงคุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษไอเสีย
- 1.2.4 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสัดส่วนปาล์มไบโอดีเซลที่เหมาะสมสำหรับใช้ผสมกับน้ำมัน BHD
- 1.2.5 วิเคราะห์การสึกหรอของส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ในการทดสอบระยะยาว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วิธีการตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นไปตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงานเรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

1.3.2 ประเมินผลกระทบของน้ำมันที่ใช้ทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลประกอบด้วยการพิจารณาดังต่อไปนี้

1.3.2.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค

1.3.2.2 การกระจายตัวของความดันภายในกระบอกสูบ และอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

1.3.2.3 มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น CO, HC, NOx และ Smoke

1.3.3 ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence (AI)) ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายตัววัตถุประสงค์ (Many-Objective Function) โดยใช้ Generalized Regression Neural Networks (GRNNs)

1.3.4 การหาจุดที่เหมาะสมของปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Many-Objective Function) โดยใช้อัลกอริทึม Reference Vector Guided Evolutional Algorithm (RVEA) ในการทำนายผล สมรรถนะ, การปล่อยมลพิษ และคุณลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากนั้นทำการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เพื่อหาสัดส่วนน้ำมันที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบระยะยาว โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว เวลาที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละน้ำมันเท่ากับ 200 ชั่วโมงเพื่อพิจารณาการสึกหรอของเครื่องยนต์เทียบกับน้ำมันดีเซล, BHD, และน้ำมันที่ได้จากการ Optimization ทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด หลังจากนั้นทำการตรวจวัดชิ้นส่วนเพื่อดูการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบ

1.4 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1.4.1 อาคารเครื่องมือ 4 (F4), อาคารเครื่องมือ 5 (F5) และอาคารเครื่องมือ 10 (F10) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4.2 อาคารศูนย์ความเป็นเลิศชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4.3 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานด้านวิศวกรรมศาสตร์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงดำเนินการตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน โดยสามารถแบ่งคุณสมบัติออกเป็นสองกลุ่มคือ 1. คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น, ความหนืด, จุดเดือด, ฯลฯ 2. คุณสมบัติทางเคมี เช่น องค์ประกอบของคาร์บอนและไฮโดรเจน, สารเติมแต่ง, ความเป็นกรด-ด่าง, ฯลฯ คุณสมบัติที่กล่าวไปมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, SG)

ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นน้ำมันเชื้อเพลิงต่อความหนาแน่นของน้ำ ค่าความถ่วงจำเพาะที่มีค่าน้อยกว่าหนึ่งหมายความว่าน้ำมันเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำซึ่งโดยทั่วไปแล้วความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งในการทดสอบจะดำเนินการภายใต้มาตรฐาน ASTM 1298

2.1.2 ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity)

ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่เพียงพอเพื่อลดความเสียหายของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในระบบ เชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงส่วนใหญ่แล้วจะมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีซึ่งมีความจำเป็นต่อระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก ค่าความหนืดจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

2.1.3 จุดวาบไฟ (Flash Point)

ในบางครั้งการเก็บรักษาหรือการขนย้ายน้ำมันไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิสูงได้ เช่น การขนส่งน้ำมันหรือการตั้งถังน้ำมันไว้กลางแจ้ง เมื่ออุณหภูมิน้ำมันสูงขึ้นก็มีโอกาสที่จะกลายเป็นไอน้ำมันและถ้าหากมีประกายไฟในบริเวณที่เก็บน้ำมันเชื้อเพลิงก็อาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้ได้ การทดสอบจุดวาบไฟจึงมีความสำคัญ การทดสอบจุดวาบไฟดำเนินการภายใต้มาตรฐาน ASTM D93

2.1.4 จุดไหลเท (Pour Point)

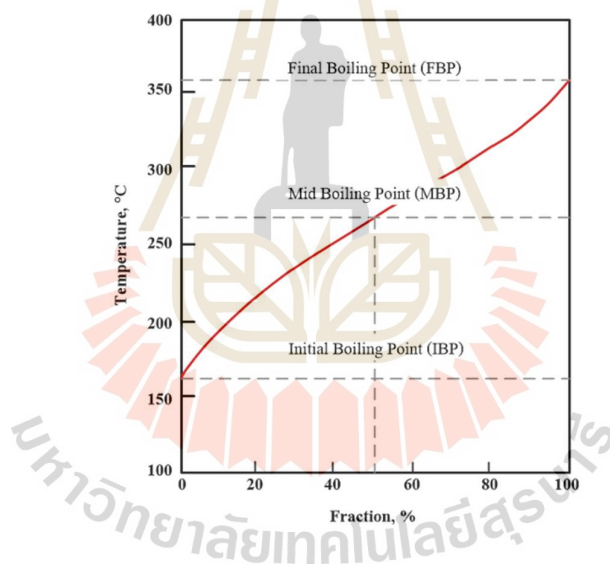
น้ำมันเชื้อเพลิงเมื่ออยู่ในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ๆ จะเกิดการไหลตัวที่ช้าลงหรือบางน้ำมันเชื้อเพลิงอาจเกิดเป็นไขในระบบส่งผลให้เครื่องยนต์ไม่สามารถฉีดน้ำมันได้ การทดสอบจุดไหลเทเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D97

2.1.5 ปริมาณกำมะถัน (Sulphur Content)

ธาตุกำมะถันสามารถพบได้โดยทั่วไปในน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะเกิดการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งทำเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฝนกรด การทดสอบปริมาณกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2622

2.1.6 การกลั่น (Distillation)

คุณสมบัติการกลั่นของน้ำมันดีเซลแสดงถึงการระเหยของน้ำมันเมื่อถูกทำให้ร้อน โดยมีจุดสำคัญได้แก่ Initial Boiling Point (IBP) ซึ่งบ่งบอกถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มระเหย, จุด 10% และ 50% ที่แสดงถึงการระเหยของน้ำมันในแต่ละสัดส่วน และจุด 90% (T90) ที่แสดงถึงการระเหยของส่วนหนักสุดของน้ำมัน สุดท้ายคือ Final Boiling Point (FBP) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำมันระเหยจนหมด คุณสมบัติเหล่านี้สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพและการเผาไหม้ของน้ำมันในเครื่องยนต์ โดยทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D86 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซลแสดงดัง รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันดีเซล

(N.K. Giri, 2011)

2.1.7 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)

การกัดกร่อนแผ่นทองแดงคือการทดสอบการกัดกร่อนของน้ำมันดีเซลต่อทองแดง โดยการจุ่มทองแดงในน้ำมันที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด จากนั้นประเมินการเปลี่ยนแปลงสีของทองแดงตามมาตรฐาน เพื่อวัดระดับการกัดกร่อน ค่าในระดับต่ำ (1A) แสดงว่าน้ำมันมีคุณภาพดีและไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนต่อระบบเครื่องยนต์และการเก็บรักษา การทดสอบการกัดกร่อนแผ่นทองแดงจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D130

2.1.8 ปริมาณน้ำและตะกอน (Water and Sediment)

การวัดปริมาณน้ำและตะกอนที่ปนเปื้อนในน้ำมัน ซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดกร่อน การอุดตันในระบบเชื้อเพลิง และปัญหาในเครื่องยนต์ การทดสอบนี้ทำตามมาตรฐาน ASTM D2709 ซึ่งใช้การปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำและตะกอนออกจากน้ำมัน ผลลัพธ์จะวัดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (vol%) ซึ่งควรต่ำกว่า 0.05% โดยปริมาตรซึ่งถูกกำหนดจากมาตรฐานน้ำมันดีเซล ASTM D975 เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันมีความบริสุทธิ์เพียงพอสำหรับการใช้งานในเครื่องยนต์และระบบเชื้อเพลิง โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหา

2.1.9 กากถ่านหรือคาร์บอน (Carbon Residue)

การทดสอบ Carbon Residue ในน้ำมันดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D524 เรียกว่า Ramsbottom Carbon Residue (RCR) ซึ่งวัดปริมาณคาร์บอนที่เหลือหลังการเผาไหม้ในสภาวะที่ไม่มียอกซิเจน ขั้นตอนคือการนำตัวอย่างน้ำมันใส่ในหลอดทดสอบและให้ความร้อนที่ประมาณ 550°C จนน้ำมันระเหยและเกิดการสลายตัว ส่วนที่เหลือจะเป็นคราบคาร์บอน ซึ่งจะถูกคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างเดิม ค่านี้ใช้ประเมินคุณภาพน้ำมันในการลดการเกิดคราบคาร์บอนในเครื่องยนต์ ช่วยรักษาประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเครื่องยนต์

2.1.10 ปริมาณเถ้า (Ash)

การทดสอบคุณสมบัติปริมาณเถ้าในน้ำมันดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D482 เป็นการวัดปริมาณสารตกค้างที่ไม่เผาไหม้หรือ Ash หลังจากการเผาไหม้น้ำมัน กระบวนการทดสอบเริ่มด้วยการนำตัวอย่างน้ำมันดีเซลใส่ในเข้าหลอมแล้วให้ความร้อนจนสารประกอบที่ติดไฟได้ทั้งหมดถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิประมาณ 775°C เหลือไว้เฉพาะคราบ Ash หลังจากนั้นจะนำเข้าหลอมมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาปริมาณ Ash เป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างเดิม ผลลัพธ์แสดงถึงปริมาณสิ่งเจือปนอินทรีย์ที่อาจทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องยนต์ การอุดตันในระบบไอเสีย และการสะสมของคราบบนหัวฉีดหรือวาล์วเครื่องยนต์ น้ำมันที่มีปริมาณ Ash ต่ำจะมีคุณภาพสูงกว่าเนื่องจากมีสิ่งเจือปนน้อย ลดความเสี่ยงต่อปัญหาดังกล่าว

2.1.11 สี (Color)

การทดสอบคุณสมบัติ Color ในน้ำมันดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D1500 เป็นการประเมินสีของน้ำมัน ซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพและความบริสุทธิ์ของน้ำมัน สีของน้ำมันดีเซลควรเป็นสีเหลืองอ่อนถึงสีอำพัน การเปลี่ยนสีเป็นสีเข้มขึ้นอาจบ่งบอกถึงการปนเปื้อน การเสื่อมสภาพ หรือการเติมสารเติมแต่ง ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วยการนำตัวอย่างน้ำมันใส่ในหลอดแก้วใส แล้วเปรียบเทียบกับมาตราสี ASTM ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 (ใส ไม่มีสี) ถึง 8 (สีอำพันเข้ม) การทดสอบนี้ช่วยให้สามารถตรวจสอบคุณภาพน้ำมันได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย หากสีของน้ำมันเบี่ยงเบนจากค่าที่คาดหวัง อาจต้องตรวจสอบเพิ่มเติมหรือดำเนินการแก้ไข

2.1.12 ตัวเลขซีเทนและดัชนีซีเทน (Cetane Number และ Cetane Index)

Cetane Number และ Cetane Index เป็นตัวชี้วัดคุณภาพการจุดระเบิดของน้ำมันดีเซล แต่มีความแตกต่างในวิธีการวัดและผลต่อเครื่องยนต์ดังต่อไปนี้

-Cetane Number เป็นการวัดโดยตรงจากการทดสอบในเครื่องยนต์ วัดระยะเวลาระหว่างการฉีดน้ำมันและการเริ่มต้นการเผาไหม้ ค่า Cetane Number ที่สูงขึ้นหมายถึงการจุดระเบิดที่รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างราบรื่น สตาร์ทง่าย เสียงรบกวนต่ำ และปล่อยมลพิษน้อยลง

-Cetane Index เป็นการคำนวณโดยอิงจากคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่นและจุดเดือด ไม่ใช่การทดสอบโดยตรงในเครื่องยนต์ จึงเป็นเพียงการประมาณค่า Cetane Number เหมาะสำหรับการควบคุมคุณภาพเบื้องต้น แต่ไม่แม่นยำเท่ากับ Cetane Number โดยเฉพาะในกรณีที่น้ำมันมีสารเติมแต่ง

ทั้งสองค่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยน้ำมันที่มี Cetane Number หรือ Cetane Index ที่เหมาะสมจะช่วยให้เครื่องยนต์ทำงานได้ดีขึ้นและลดการปล่อยก๊าซพิษ

2.1.13 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value)

Heating Value หรือค่าความร้อนของน้ำมันคือการวัดปริมาณพลังงานที่ปล่อยออกมาเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ เป็นคุณสมบัติสำคัญที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะของเครื่องยนต์ ประเภทของ Heating Value แบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. Higher Heating Value (HHV)

HHV หรือ Gross Calorific Value เป็นการวัดพลังงานทั้งหมดที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ รวมถึงพลังงานในรูปของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยสมมติว่ามีการควบแน่นของไอน้ำและเก็บพลังงานแฝงไว้

2. Lower Heating Value (LHV)

LHV หรือ Net Calorific Value เป็นค่าพลังงานที่สามารถใช้ได้จริงหลังจากไอน้ำระเหยออกไป ไม่รวมพลังงานแฝงที่อยู่ในไอน้ำ จึงเป็นค่าที่นิยมใช้ในงานจริงมากกว่า เพราะแสดงถึงพลังงานที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในสภาพการทำงานปกติ

ประสิทธิภาพเชื้อเพลิง Heating Value มีผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่เครื่องยนต์สามารถสกัดได้จากเชื้อเพลิง ค่า Heating Value ที่สูงขึ้นหมายความว่าเชื้อเพลิงให้

พลังงานต่อหน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิง สมรรถนะของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลที่มีค่า Heating Value สูงสามารถผลิตกำลังได้มากขึ้น ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานที่ต้องการพลังงานสูง เช่น การขนส่งหนักหรือการผลิตไฟฟ้า ผลกระทบทางเศรษฐกิจ เชื้อเพลิงที่มี Heating Value สูงมักจะมีความคุ้มค่ามากกว่า เพราะสามารถให้พลังงานมากขึ้นต่อหน่วยน้ำหนักหรือปริมาตร ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการทำงานแต่ละอย่าง

โดยทั่วไป น้ำมันดีเซลมีค่า Higher Heating Value อยู่ที่ประมาณ 44 MJ/kg (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) และ Lower Heating Value อยู่ที่ประมาณ 42.5 MJ/kg การเข้าใจค่า Heating Value ของน้ำมันดีเซลเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ประหยัดพลังงาน และเพิ่มความคุ้มค่าในหลาย ๆ การใช้งาน ตั้งแต่การขนส่งไปจนถึงการผลิตไฟฟ้า การทดสอบคุณสมบัตินี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกและควบคุมคุณภาพของเชื้อเพลิงดีเซล

2.1.14 คุณสมบัติการหล่อลื่น (Lubricity)

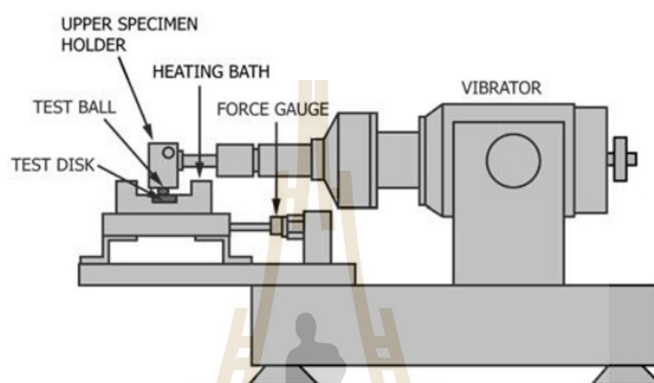
การทดสอบคุณสมบัติ Lubricity ในน้ำมันดีเซลเป็นการวัดความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมัน เพื่อป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนในระบบเชื้อเพลิง โดยเฉพาะหัวฉีดและปั๊มเชื้อเพลิง คุณสมบัติการหล่อลื่นนี้จะทดสอบตามมาตรฐาน CEC F-06-A-96 ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรปที่ใช้ในการทดสอบ Lubricity ของน้ำมันดีเซล โดยใช้เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จำลองการเคลื่อนที่ไปมาของลูกบอลเหล็กบนแผ่นเหล็กในสถานะที่แช่อยู่ในน้ำมันดีเซล ขนาดของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นจะถูกวัดและใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมัน ยิ่งรอยสึกหรอมีขนาดเล็กแสดงว่าน้ำมันมี Lubricity ที่ดี นอกจากมาตรฐานการทดสอบที่กล่าวไปยังมีมาตรฐานการทดสอบการหล่อลื่นของน้ำมันอื่น ๆ ที่ใช้ทดสอบ เช่น

ASTM D6079 เป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกา ซึ่งใช้วิธี HFRR เช่นเดียวกับ CEC F-06-A-96 อย่างไรก็ตาม ASTM D6079 เน้นที่การทดสอบคุณสมบัติ Lubricity ของน้ำมันดีเซลที่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย และถูกใช้งานมากขึ้น หลังจากการบังคับใช้ Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD) ซึ่งมีการลดปริมาณกำมะถันลงทำให้ Lubricity ลดลงไปด้วย

ISO 12156-1: เป็นมาตรฐานสากลที่เทียบเท่ากับ ASTM D6079 และ CEC F-06-A-96 โดยใช้วิธี HFRR ในการทดสอบ Lubricity ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบตาม ISO 12156-1 และ ASTM D6079 มักจะสามารถใช้แทนกันได้ในระดับสากล

EN 590: เป็นมาตรฐานยุโรปที่กำหนดความต้องการและวิธีทดสอบน้ำมันดีเซลสำหรับยานยนต์ ซึ่งรวมถึงการกำหนดขีดจำกัดของค่าความสามารถในการหล่อลื่นตามการทดสอบ HFRR ที่ไม่เกิน 460 ไมโครเมตร

มาตรฐาน CEC F-06-A-96 นั้นมีความใกล้เคียงกับ ASTM D6079 และ ISO 12156-1 เนื่องจากใช้เครื่องมือและวิธีการทดสอบเดียวกัน แต่เน้นไปทั้งงานวิจัยและพัฒนา น้ำมันดีเซลในยุโรปเป็นหลัก ขณะที่ ASTM D6079 และ ISO 12156-1 มีการใช้งานที่แพร่หลายในระดับสากล มาตรฐานทั้งหมดนี้มีบทบาทสำคัญในการประเมินและรับรองคุณภาพของน้ำมันดีเซลในการปกป้องเครื่องยนต์จากการสึกหรอ



รูปที่ 2.2 เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR)
(International Standard: ISO 12156-1, 2006)

2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

การกำหนดคุณลักษณะของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์หรือน้ำมัน BHD (Bio-Hydrogenated Diesel) ในประเทศไทยถูกกำหนดโดยใช้มาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของน้ำมันไฮโดรเจน และการผสมน้ำมันไบโอดีเซลเข้ากับน้ำมันดีเซลหลัก โดยมาตรฐานหลักที่ใช้มักจะเป็นมาตรฐาน ASTM D975 สำหรับน้ำมันดีเซล หรือ EN 590 ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรปสำหรับน้ำมันดีเซลออตโนมัติ และยังอาจมีการอ้างอิงมาตรฐานอื่น ๆ เช่น ASTM D6751 สำหรับไบโอดีเซล และ EN 14214 สำหรับคุณลักษณะของ Fatty Acid Methyl Ester (FAME) ในไบโอดีเซล การทดสอบจะใช้มาตรฐานเป็นตัวกำหนด ในประเทศไทยกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดลักษณะและคุณภาพของเชื้อเพลิงแสดงดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดลักษณะคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน ตามกรมธุรกิจพลังงาน (กรมธุรกิจพลังงาน, 2556b)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูง-ต่ำ	วิธีการทดสอบ ¹
1	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์	%wt	≥ 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15 °C	kg/m ³	≥ 860 และ ≤ 900	ASTM D1298
3	ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C	sCt	≥ 3.5 และ ≤ 5.0	ASTM D445
4	จุดวาบไฟ	°C	≥ 120	ASTM D93
5	กำมะถัน	%wt	≤ 0.0010	ASTM D2622
6	กากถ่าน	%wt	≤ 0.30	ASTM D4560
7	ตัวเลขซีเทน	-	≥ 51	ASTM D613
8	เถ้าซิลิเกต	%wt	≤ 0.02	ASTM D874
9	ปริมาณน้ำ	mg/kg	≤ 500	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	mg/kg	≤ 24	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	-	$\leq$ หมายเลข 1	ASTM D130
12	เสถียรภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	-	≥ 10	EN 15751
13	ค่าความเป็นกรด	mg KOH/g	≤ 0.50	ASTM D664
14	ค่าไอโอดีน	gram Iodine/100 g	≤ 120	EN14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเตอร์	%wt	≤ 12.0	EN 14103
16	เมทานอล	%wt	≤ 0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์	%wt	≤ 0.70	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์	%wt	≤ 0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์	%wt	≤ 0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ	%wt	≤ 0.02	EN 14105

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูง-ต่ำ	วิธีการทดสอบ ¹
21	กลีเซอรินทั้งหมด	%wt	≤ 0.25	EN 14105
22	ปริมาณโลหะ	mg/kg	≤ 5.0	EN 14538
23	ฟอสฟอรัส	%wt	≤ 0.0010	EN 14107
24	จุดชุน	°C	รายงาน ²	
25	จุดจุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ	°C	รายงาน ²	
26	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	-	ให้เป็นไปตามความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

หมายเหตุ

¹ วิธีการทดสอบอาจใช้วิธีอื่นเทียบได้ แต่ในกรณีที่มิเช่นนั้นให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

² ให้ผู้ค้าน้ำมันรายงานอริบติเป็นรายไตรมาส ภายในวันที่ 15 ของเดือนถัดไปจากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

ข้อกำหนดคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศไทยถูกกำหนดตามมาตรฐานที่ออกโดยกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งมีการอ้างอิงมาตรฐานสากลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก เช่น มาตรฐานยุโรป (EURO) และมาตรฐานจากองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (ISO) เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงที่จำหน่ายและใช้งานในประเทศอย่างเข้มงวด ข้อกำหนดเหล่านี้มีเป้าหมายเพื่อให้แน่ใจว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่จำหน่ายในประเทศไทยมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานในเครื่องยนต์ การขนส่ง และการค้าพาณิชย์ รวมถึงมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน

มาตรฐาน EURO เป็นหนึ่งในมาตรฐานที่ประเทศไทยนำมาใช้ในการกำหนดคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยในปัจจุบัน ประเทศไทยใช้มาตรฐาน EURO4 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นเพื่อควบคุมปริมาณการปล่อยไอเสียจากยานยนต์ให้ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับมาตรฐานก่อนหน้านี้ เช่น EURO1 ถึง EURO3 มาตรฐาน EURO4 มีข้อกำหนดที่เข้มงวดเกี่ยวกับปริมาณสารเจือปนต่าง ๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น กำมะถัน ตะกั่ว และสารประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมปริมาณกำมะถัน ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดการปล่อยมลพิษประเภทก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาฝนกรดและมลพิษทางอากาศ

สำหรับน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ใช้ในประเทศไทย มาตรฐาน EURO4 กำหนดให้มีปริมาณสารโอเลฟินไม่เกิน 18% โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังมีการกำหนดปริมาณตะกั่วในน้ำมันเบนซินไม่เกิน 0.005 กรัมต่อลิตร และกำมะถันไม่เกิน 50 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ส่วนในน้ำมันดีเซล มาตรฐาน EURO4 กำหนดให้มีปริมาณสาร Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) ไม่เกิน

18% โดยน้ำหนัก กำมะถันไม่เกิน 50 ppm และกำหนดค่าตัวเลขซีเทนไม่ต่ำกว่า 50 เพื่อลดการปล่อยไอเสียที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ

นอกจากมาตรฐาน EURO4 ที่ใช้ในประเทศไทยแล้ว ยังมีการเตรียมความพร้อมสำหรับการปรับปรุงมาตรฐานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับมาตรฐาน EURO5 และ EURO6 ในอนาคต เพื่อให้ประเทศไทยมีการควบคุมมลพิษที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทั้งนี้การใช้มาตรฐานที่สูงขึ้นไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณการปล่อยมลพิษ แต่ยังส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดความเสี่ยงต่อการปล่อยมลพิษในระยะยาวอีกด้วย

ในส่วนของมาตรฐานอื่น ๆ ที่ใช้ในประเทศไทย เช่น มาตรฐาน ISO และมาตรฐานอเมริกา (ASTM) ก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเสริมสร้างความมั่นใจในคุณภาพและความปลอดภัยของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ภายในประเทศ ซึ่งมาตรฐานเหล่านี้ครอบคลุมทั้งคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมัน เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดและความต้องการของตลาดภายในประเทศ รวมถึงการป้องกันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนในระยะยาว

2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์

สมรรถนะของเครื่องยนต์เป็นหัวข้อที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องยนต์ให้ตอบสนองต่อความต้องการ ซึ่งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเครื่องยนต์นั้นมีหลายประการ โดยแต่ละพารามิเตอร์มีบทบาทที่แตกต่างกันและมีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1 แรงบิด

แรงบิด (Torque) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการรับภาระของเครื่องยนต์ แรงบิดที่สูงช่วยให้เครื่องยนต์มีความสามารถในการรับน้ำหนักและทำงานหนักได้ดีขึ้น เครื่องยนต์ที่มีกำลังอัดสูงจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงหรือเครื่องยนต์ที่มีรัศมีเพลาค่อนข้างยาวจะส่งผลให้แรงบิดมีกำลังสูง แสดงดังสมการ 2.1

$$T = F \cdot R \quad (2.1)$$

โดยที่	T	คือ แรงบิดของเครื่องยนต์ (N-m)
	F	คือ แรงตั้งฉากที่กระทำต่อโพลดเซลล์ (N)
	R	คือ ระยะจากจุดหมุนจนถึงแนวแรง (m)

2.3.2 กำลังเบรก

กำลังงานเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่บอกถึงความสามารถของเครื่องยนต์ในการผลิตงานออกมาในช่วงเวลาหนึ่ง โดยกำลังงานมักถูกวัดเป็นแรงม้า (Horsepower) หรือกิโลวัตต์ (kW) ซึ่งกำลังงานสูงย่อมหมายถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น เครื่องยนต์ที่มีกำลังงานมากจะสามารถขับเคลื่อนยานพาหนะให้เคลื่อนที่ได้รวดเร็วและสามารถรับมือกับการใช้งานที่หนักได้ดี แสดงดัง **สมการ 2.2**

$$P_b = \frac{2\pi NT}{60} \quad (2.2)$$

โดยที่	P_b	คือ กำลังเบรกของเครื่องยนต์ (W)
	N	คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM)
	T	คือ แรงบิดของเครื่องยนต์ (N-m)

2.3.3 ความดันยังผลเฉลี่ย (Mean Effective Pressure (MEP))

เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดย MEP เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของเครื่องยนต์ในการผลิตกำลังงาน โดยไม่คำนึงถึงขนาดหรือปริมาตรของเครื่องยนต์ MEP จะถูกคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของความดันภายในกระบอกสูบตลอดหนึ่งรอบการทำงานของเครื่องยนต์ MEP มีหน่วยเป็นหน่วยความดัน เช่น ปาสกาล (Pa) หรือบาร์ (bar) และสามารถแยกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ตามการคำนวณ เช่น

1. Indicated Mean Effective Pressure (IMEP) ค่าความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ที่ได้จากการคำนวณจากแรงที่เกิดขึ้นจริงภายในกระบอกสูบโดยตรง โดยไม่หักลบพลังงานที่สูญเสียไปกับแรงเสียดทาน

2. Brake Mean Effective Pressure (BMEP) ค่าความดันยังผลเฉลี่ยเบรกที่ได้จากการวัดแรงบิดที่ส่งผ่านไปยังเพลลา (Brake Torque) ซึ่งรวมถึงการหักลบพลังงานที่สูญเสียไปกับแรงเสียดทานและส่วนที่ไม่เป็นประโยชน์อื่น ๆ

3. Friction Mean Effective Pressure (FMEP) ค่าความดันยังผลเฉลี่ยเสียดทานที่คำนวณจากความสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์

ค่า MEP สามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ต่าง ๆ ได้ โดยทั่วไปแล้ว ค่าที่สูงขึ้นแสดงถึงเครื่องยนต์ที่สามารถผลิตกำลังงานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาตรการแทนที่

ของเครื่องยนต์เดียวกัน นอกจากนี้ MEP ยังมีความสำคัญในการออกแบบเครื่องยนต์เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดจากปริมาตรกระบอกสูบที่กำหนด ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีของประสิทธิภาพทางกลของเครื่องยนต์ โดยตัวอย่างการคำนวณความดันยังผลเฉลี่ยเบรกแสดงดังสมการ 2.3

$$b_{mep} = \frac{P_b n_R}{V_d N} \quad (2.3)$$

โดยที่ b_{mep} คือ ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (kPa)

V_d คือ ปริมาตรของกระบอกสูบ (m^3)

n_R คือ จำนวนรอบการหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงใน 1 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

N คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (rps)

2.3.4 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะในเครื่องยนต์ (Specific Fuel Consumption (SFC)) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้วัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในการใช้เชื้อเพลิง โดยบอกถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตกำลังงานหนึ่งหน่วย มักถูกใช้ในการประเมินเครื่องยนต์ทั้งในแง่ของการใช้พลังงานและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน SFC มีสองประเภทหลักได้แก่

1. Indicated Specific Fuel Consumption (ISFC) อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะบ่งชี้ที่คำนวณจากกำลังงานภายในกระบอกสูบ (Indicated Power) โดยไม่หักลบความสูญเสียภายในเครื่องยนต์

2. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรกต่อกำลังที่วัดได้จากเพลาของเครื่องยนต์หรือแรงบิด (Brake Power) มีหน่วยเป็นกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (g/kWh) หรือกรัมต่อแรงม้าชั่วโมง (g/hp·h) ตัวชี้วัดนี้บ่งบอกว่าเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงมากน้อยเพียงใดในการสร้างกำลังที่ใช้ได้จริง

ค่า SFC ต่ำแสดงถึงเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการใช้เชื้อเพลิง โดยเครื่องยนต์ที่มีค่า SFC น้อยจะใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าในการผลิตกำลังงานที่เท่ากัน จึงเป็นตัวชี้วัดสำคัญสำหรับการประหยัดพลังงานในงานวิจัยนี้ใช้ bsfc ในการวัดอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะโดยมีการคำนวณดังสมการ 2.4

$$\text{bsfc} = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (2.4)$$

โดยที่ bsfc คือ อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรก (g/kW-hr)

P_b คือ กำลังเบรกของเครื่องยนต์ (kW)

$\dot{m}_f$ คือ อัตราการไหลของมวลน้ำมันเชื้อเพลิง (g/hr)

2.3.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ในเครื่องยนต์คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ถูกแปลงเป็นงานกลกับพลังงานทั้งหมดที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงจะสามารถเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานกลได้มากขึ้น โดยสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อยลง การหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนนิยมใช้กำลังเบรกในการหาจึงเรียกว่า (Brake Thermal Efficiency, η_b) โดยแสดงดังสมการ 2.5 โดยค่าประสิทธิภาพจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ยิ่งค่าประสิทธิภาพสูง เครื่องยนต์ก็จะยิ่งใช้เชื้อเพลิงได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตาม เครื่องยนต์สันดาปภายในทั่วไปจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 25-40% เนื่องจากการมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนและการเสียดทาน

$$\eta_b = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad (2.5)$$

โดยที่ η_b คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

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

Q_{HV} $\dot{m}_f$ คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg)

2.3.6 ความดันในกระบอกสูบ

ค่าความดันในกระบอกสูบ (In-Cylinder Pressure) คือ ความดันที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์สันดาปภายในระหว่างกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ความดันนี้ถูกสร้างขึ้นจากการจุดระเบิดของส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้เกิดความดันสูงที่ดันลูกสูบลง ส่งผลให้เครื่องยนต์ผลิตแรงบิดและกำลังงานออกมา ค่าความดันในกระบอกสูบเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังและสมรรถนะของเครื่องยนต์ ความดันที่สูงขึ้นมักจะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพและกำลังงานที่สูงขึ้น

2.3.7 อัตราการปลดปล่อยความร้อน

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Rate of Heat Release (ROHR)) คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบต่อองศาเซลเซียสหรือหน่วยอื่น ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราที่พลังงานถูกปลดปล่อยออกมาและส่งผลต่อการขยายตัวของแก๊สในกระบอกสูบ กระบวนการนี้มีผลต่อความดันในกระบอกสูบ กำลังงานที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ การวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยความร้อนช่วยให้เข้าใจลักษณะการเผาไหม้และปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ การลดมลพิษ และการปรับปรุงการจุดระเบิดให้เหมาะสม การคำนวณอัตราการปลดปล่อยความร้อนแสดงดังสมการ 2.6

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} \cdot V \frac{dP}{d\theta} \quad (2.6)$$

โดยที่ $\frac{dQ}{d\theta}$	คือ อัตราการปลดปล่อยความร้อน (J/°CA)
γ	คือ อัตราส่วนของค่าความร้อนจำเพาะ (C_p / C_v)
θ	คือ องศาเซลเซียสหรือหน่วยอื่น (°CA)
P	คือ ความดันในห้องเผาไหม้ (Pa)
$\frac{dV}{d\theta}$	คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรกระบอกสูบที่ตำแหน่งข้อเหวี่ยงใด ๆ ($m^3/°CA$)
$\frac{dP}{d\theta}$	คือ การเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบที่ตำแหน่งข้อเหวี่ยงใด ๆ ($Pa/°CA$)

2.3.8 การวิเคราะห์ความเสียหาย

การวิเคราะห์ความเสียหายในบริบทของวิชาโทรโบลยี มักจะเกี่ยวข้องกับการระบุสาเหตุของการล้มเหลวทางกลไกในส่วนประกอบที่ทำงานภายใต้สภาวะการสั่นหรือ แรงเสียดทาน และการหล่อลื่น โหมดความเสียหายอาจรวมถึงความเมื่อยล้าจากการสัมผัส การเกิดอนุภาคการสั่นหรือ และการเสื่อมสภาพของพื้นผิว ซึ่งได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ การหล่อลื่น และความเค้นจากการทำงาน ประเด็นสำคัญของการวิเคราะห์ความเสียหายมีดังนี้

1. การเริ่มต้นของรอยร้าว รอยร้าวสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ เช่น การมีสิ่งปลอมปนหรือมีความเค้นตกค้าง รอยร้าวเหล่านี้อาจขยายใหญ่ขึ้นตามเวลา ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายทั้งบนพื้นผิวหรือภายใต้พื้นผิวภายใต้การรับน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงซ้ำ ๆ

2. การสึกหรอและความล้า ความเสียหายที่ผิวหน้าอาจเกิดขึ้นในรูปแบบของการกะเทาะ การสึกกร่อน หรือการหลุดลอก ซึ่งมักเกิดจากความเมื่อยล้าของการสัมผัสที่เกิดจากการหมุนหรือการเลื่อน

3. การเกิดอนุภาคสึกหรอ อนุภาคการสึกหรอที่มักเกิดขึ้นจากรอยร้าวที่ขยายจากความล้า สามารถทำให้กระบวนการความเสียหายแย่ลงได้อีกโดยการปนเปื้อนสารหล่อลื่นหรือทำให้เกิดความเค้นเพิ่มเติมบนพื้นผิววัสดุ

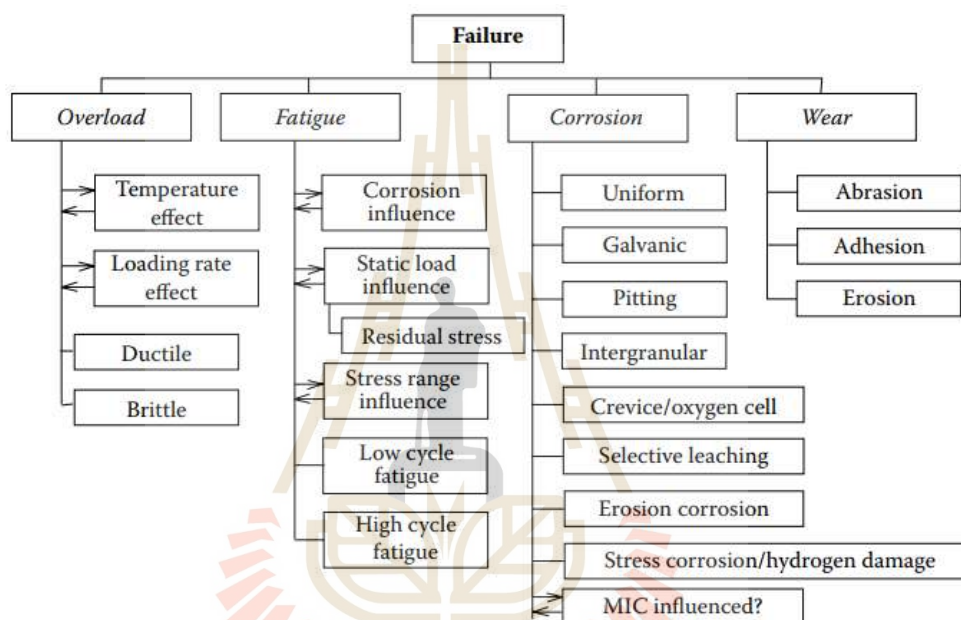
4. การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจสอบอนุภาคการสึกหรอและความเสียหายของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์สามารถเปิดเผยข้อมูลมากมายเกี่ยวกับกลไกของความเสียหาย ซึ่งช่วยให้วิศวกรสามารถย้อนกลับไปหาสาเหตุหลักได้ เช่น การหล่อลื่นที่ไม่เหมาะสม ความเค้นเกิน หรือคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่สอดคล้องกัน

กลไกที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอและความล้า รวมถึงกลยุทธ์ในการลดความเสียหายเหล่านี้ เป็นหัวข้อสำคัญในวิชาโทรโบโลยีเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีความสำคัญต่อการเพิ่มความทนทานและประสิทธิภาพของส่วนประกอบ

การเสื่อมสภาพของชิ้นงานหรือเครื่องจักรไม่ว่าจะมาจากขาดการซ่อมบำรุงหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรมีการใช้งานเกินระยะเวลาการซ่อมบำรุงซึ่งจะนำไปสู่ความเสียหายแก่เครื่องจักร ชิ้นงานเมื่อถูกใช้ไปจะเกิดความเสื่อมสภาพตามระยะเวลาการใช้งานซึ่งเกิดจากกลไกความเสียหายของชิ้นงาน (Failure Mechanisms) ซึ่งสามารถแบ่งกลไกความเสียหายได้ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1. กลไกความเสียหายที่เกิดจากการรับโหลดเกิน (Overstress Mechanisms) ในกรณีนี้จะเกิดความเสียหายได้ก็ต่อเมื่อค่าความเค้นที่เกิดในชิ้นงาน (Stress) มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของชิ้นงาน (Strength) เช่น เสาอากาศที่มีลักษณะอ่อนตัว ขนาดเล็กและสูงมีโอกาสจะเกิดความเสียหายแบบการเสียรูปแบบยืดหยุ่นสูง (Large Elastic Deformation) เนื่องจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่นสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ไม่ทำให้วัสดุเสียหายจึงมีการแกว่งไปมาของวัสดุซึ่งก่อให้เกิดการสั่นในระบบ หากการสั่นมีความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติหรือมีแรงภายนอกมากกระทำก็อาจส่งผลให้เกิดการรับแรงเกินขนาดจากการแอ่นตัวของเสาได้ และ 2. กลไกการเสื่อมสภาพ (Wear-Out Mechanisms) ในกรณีนี้จะเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุและเกิดความเสียหายถึงแม้ว่าความเค้นที่กระทำต่อวัสดุจะไม่ถึงจุดคราก (Yield Strength) แต่ความเค้นนี้จะสะสมในชิ้นงานถึงแม้ว่าจะมีการอบคืนตัวของวัสดุก็ไม่อาจจะสลایความเค้นที่สะสมได้หมดหรือการเสื่อมสภาพของวัสดุอาจเกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion) และจากการสึกหรอ (Wear) ในรูปแบบต่าง ๆ [Ben-Daya M. et al., 2016] โดยรูปแบบกลไกความเสียหายเพิ่มเติมสามารถดูได้จาก**รูปที่ 2.3**

การทดสอบเครื่องย่นระยะยาวของงานวิจัยนี้มีการกำหนดโหลดและความเร็วที่คงที่ตลอดการทดสอบและมีการตรวจสอบซ่อมบำรุงอุปกรณ์จับยึดเป็นระยะดังนั้นจึงมีโอกาที่จะเกิดความ

เสียหายจากการรับโหลดเกินน้อยมาก การเสียหายในชิ้นส่วนเครื่องยนต์จะเป็นในรูปแบบของการกลไกการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป การเสียหายของชิ้นส่วนทางกลหนึ่งชิ้นอาจเกิดได้จากกลไกการสึกหรอหนึ่งประเภทหรือมากกว่าหนึ่งประเภทร่วมกันก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน การเกิดความเสียหายในชิ้นงานมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากเกิดจากหลายปัจจัยรวมกันจึงยากที่จะระบุสาเหตุได้จากการสังเกตได้ด้วยตาเปล่า การใช้กล้องไมโครสโคปจะช่วยขยายพื้นผิวให้เห็นพื้นที่ความเสียหายของวัสดุที่ชัดเจนมากขึ้น



รูปที่ 2.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายในแต่ละประเภทของชิ้นงานทางกล

[Neville W. et. al., 2007]

2.4 การหล่อลื่นในเครื่องยนต์ดีเซล

การหล่อลื่นในเครื่องยนต์ดีเซลเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างราบรื่นและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยน้ำมันหล่อลื่นทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว เช่น ลูกสูบ เพลา ลูกเบี้ยว และแบริ่ง ซึ่งต้องเผชิญกับสภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูงภายในกระบอกสูบ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะสร้างฟิล์มบาง ๆ ระหว่างชิ้นส่วนโลหะเหล่านี้ ช่วยลดการสึกหรอ ความร้อน และการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการเสียดสีโดยตรง น้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลมักผสมสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การทนต่อการเกิดออกซิเดชัน การป้องกันการกัดกร่อน และการลดการสะสมของคราบเขม่าและสิ่งสกปรกในเครื่องยนต์ เพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและลดความจำเป็นในการซ่อมบำรุง การเลือกใช้

น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดและคุณสมบัติเหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซลจะช่วยให้เครื่องยนต์ทำงานได้ดีทั้งในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและต่ำ โดยช่วยลดการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนและป้องกันปัญหาต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องยนต์ในระยะยาว

2.4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น

องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ น้ำมันฐานและสารเติมแต่ง ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการทำงานของน้ำมันหล่อลื่น ดังนี้

1. น้ำมันฐาน (Base Oil) เป็นส่วนประกอบหลักของน้ำมันหล่อลื่น มีหน้าที่ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนเครื่องยนต์และช่วยลดการเสียดทาน น้ำมันฐานแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้แก่

-น้ำมันแร่ (Mineral Oils) เป็นน้ำมันที่สกัดจากปิโตรเลียม มีคุณสมบัติพื้นฐานในการหล่อลื่นและใช้เป็นส่วนประกอบหลักในน้ำมันหล่อลื่นหลายชนิด

-น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oils) เป็นน้ำมันที่ผลิตจากกระบวนการเคมีขั้นสูง มีคุณสมบัติที่ดีกว่าน้ำมันแร่ในด้านความเสถียรทางอุณหภูมิ การทนต่อการเสื่อมสภาพ และการหล่อลื่นในสภาวะที่หนักหน่วง

-น้ำมันผสม (Blended Oils) เป็นการผสมระหว่างน้ำมันแร่และน้ำมันสังเคราะห์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุดจากทั้งสองประเภท

2. สารเติมแต่ง (Additives) สารเติมแต่งเป็นส่วนที่ผสมลงไปในน้ำมันฐานเพื่อเสริมคุณสมบัติเฉพาะให้กับน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและป้องกันการเสียหายของเครื่องยนต์ สารเติมแต่งที่ใช้ทั่วไปได้แก่

-สารต้านการสึกหรอ (Anti-Wear Agents) ช่วยลดการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่เกิดจากการเสียดสี โดยสารที่นิยมใช้คือ ZDDP (Zinc Dialkyldithiophosphate)

-สารทำความสะอาด (Detergents) ช่วยขจัดคราบสกปรกและป้องกันการสะสมของคราบเขม่าที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์

-สารกระจาย (Dispersants) ช่วยกระจายอนุภาคสกปรกและเขม่าที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ไม่ให้เกาะกันเป็นคราบ

-สารปรับปรุงความหนืด (Viscosity Index Improvers) ช่วยรักษาความหนืดของน้ำมันให้คงที่ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ช่วยให้เครื่องยนต์ทำงานได้ดีทั้งในสภาวะอากาศร้อนและเย็น

-สารต้านการออกซิเดชัน (Anti-oxidants) ป้องกันการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมคุณภาพของน้ำมัน

-สารกันการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors) ป้องกันการกัดกร่อนของชิ้นส่วนโลหะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำ

-สารต้านฟอง (Foam Inhibitors) ลดการเกิดฟองในน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งฟองอาจทำให้น้ำมันหล่อลื่นทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

-สารปรับลดแรงเสียดทาน (Friction Modifiers) ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์และช่วยประหยัดพลังงาน

-สารเพิ่มความดัน (Extreme Pressure Additives) ช่วยเพิ่มความสามารถทนต่อความดันสูงและป้องกันการสึกหรอในสภาวะที่มีความดันสูง เช่น ในเครื่องยนต์ที่ต้องทำงานหนัก

-สารแยกน้ำ (Demulsifiers) ช่วยแยกน้ำออกจากน้ำมันหล่อลื่น ป้องกันไม่ให้น้ำทำให้เกิดการกัดกร่อนหรือการสึกหรอภายในเครื่องยนต์

การผสมผสานของน้ำมันฐานและสารเติมแต่งเหล่านี้ช่วยให้น้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซล ช่วยลดแรงเสียดทาน ป้องกันการสึกหรอ และรักษาความเสถียรของเครื่องยนต์ในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์และลดความจำเป็นในการซ่อมบำรุง

2.4.2 วิธีการทดสอบและคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นประกอบไปด้วยหลายมาตรฐานขึ้นอยู่กับภูมิภาค ในประเทศไทยได้ใช้มาตรฐาน ASTM ในการกำหนดคุณลักษณะของน้ำมันหล่อลื่นโดยการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

1. ความหนืด (Kinematic Viscosity)

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับการยอมรับในวงการอุตสาหกรรมสำหรับการประเมินคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นการทดสอบตาม ASTM D445 วัดค่าความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของของเหลวภายใต้แรงโน้มถ่วง ค่าที่วัดได้คือเวลาที่น้ำมันหล่อลื่นไหลผ่านหลอดวัด (Capillary Viscometer) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้สูตรในการคำนวณค่าความหนืดจากเวลาและปริมาตรของของเหลว ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากความหนืดส่งผลต่อประสิทธิภาพการหล่อลื่นและการป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในเครื่องยนต์ ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีบทบาทสำคัญในหลาย ๆ ด้าน เช่น การลดแรงเสียดทาน, การสร้างฟิล์มป้องกันการสึกหรอ, การควบคุมอุณหภูมิให้แก่เครื่องยนต์, การหล่อลื่นในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช่วยสร้างความเสถียรในการหล่อลื่น เป็นต้น น้ำมันที่มีค่าความหนืดเหมาะสมจะช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์และช่วยลดการซ่อมบำรุงในระยะยาว

2. จุดไหลเท (Pour Point)

อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังคงสามารถไหลได้ภายใต้สภาวะที่มีแรงโน้มถ่วงปกติ การทดสอบจุดไหลเทมีความสำคัญในการประเมินว่าน้ำมันสามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำมากเพียงใด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการหล่อลื่นในเครื่องยนต์หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้งานในสภาพอากาศหนาวเย็น เมื่ออุณหภูมิลดลง น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มมีความหนืดเพิ่มขึ้นและอาจกลายเป็นกึ่งของแข็ง ซึ่งทำให้สูญเสียความสามารถในการไหลและการหล่อลื่นที่เพียงพอ หากน้ำมันมีจุดไหลเทที่สูงเกินไป เมื่ออุณหภูมิลดลงในสภาพการทำงานที่เย็นจัด น้ำมันอาจไม่สามารถไหลไปหล่อลื่นชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดการเสียดสีและเสียหาย การทราบจุดไหลเทของน้ำมันจึงช่วยให้สามารถเลือกน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่เครื่องยนต์จะใช้งาน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำหรือในฤดูหนาว

3. จุดวาบไฟ (Flash point)

อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันสามารถปล่อยไอที่มีความเข้มข้นเพียงพอที่จะติดไฟได้ชั่วขณะเมื่อมีแหล่งจุดไฟ เช่น ประกายไฟ จุดวาบไฟเป็นตัวบ่งชี้ความเสถียรของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อทำงานในสภาพที่มีอุณหภูมิสูง และช่วยประเมินความเสี่ยงในการเกิดไฟไหม้หรือระเบิด

4. การเกิดฟองอากาศ (Form)

การเกิดฟองอากาศในน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน ASTM D892 คือการทดสอบเพื่อตรวจวัดแนวโน้มที่น้ำมันหล่อลื่นจะเกิดฟองเมื่อสัมผัสกับอากาศภายใต้สภาวะการทำงานที่มีการกวหรือตกกระแทก ซึ่งการเกิดฟองสามารถลดประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นได้ เนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นอาจไปลดความสามารถในการหล่อลื่น ลดการป้องกันการสึกหรอ และส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์หรือระบบต่าง ๆ โดยน้ำมันที่มีฟองอากาศเกิดขึ้นมากจะถูกพิจารณาว่าอาจมีความเสี่ยงต่อการทำงานที่ผิดปกติในระบบหล่อลื่น

5. ปริมาณน้ำ (Water)

มาตรฐาน ASTM E2412 เป็นวิธีการทดสอบแบบสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy) ที่ใช้ในการตรวจสอบการปนเปื้อนและการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น รวมถึงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นด้วยน้ำในน้ำมันหล่อลื่นอาจเกิดจากความชื้นในอากาศ การรั่วซึมของระบบระบายความร้อน หรือการทำงานในสภาวะที่มีความชื้นสูง ซึ่งน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการหล่อลื่นและการปกป้องชิ้นส่วนเครื่องยนต์ มาตรฐาน ASTM E2412 ใช้เทคโนโลยี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในการวัดปริมาณน้ำในน้ำมัน โดยเทคนิคนี้จะวัดปริมาณน้ำโดยอาศัยสัญญาณการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะของน้ำ เมื่อผ่านกระบวนการตรวจวิเคราะห์ด้วย FTIR สัญญาณที่เกิดจากน้ำจะสามารถแยกออกจากสัญญาณของสารประกอบอื่น ๆ ในระบบน้ำมันได้

6. ค่าความเป็นด่าง (Total Base Number (TBN))

ความสามารถของน้ำมันในการต้านทานการเกิดกรดและป้องกันการกัดกร่อนภายในเครื่องยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์ดีเซลที่เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน ซึ่งอาจทำให้เกิดกรดซัลฟิวริกหรือสารที่เป็นกรดอื่น ๆ น้ำมันหล่อลื่นที่มีค่า TBN สูงจะสามารถทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากสารเติมแต่งที่เป็นด่างจะช่วยทำให้กรดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นกลาง ดังนั้นการวัดค่า TBN จึงมีความสำคัญในการประเมินสภาพของน้ำมันหล่อลื่นว่ามีความสามารถในการป้องกันการเกิดกรดและกัดกร่อนได้มากน้อยเพียงใด การทดสอบค่าความเป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่นมักดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D2896 ซึ่งใช้วิธีการไทเทรต (Titration) เพื่อวัดความเข้มข้นของสารประกอบที่เป็นด่างในน้ำมันหล่อลื่น ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกแสดงเป็นมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อน้ำมัน 1 กรัม (mg KOH/g) ค่า TBN ปกติในน้ำมันหล่อลื่นใหม่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจะอยู่ในช่วง 8-15 mg KOH/g ขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน

7. ค่าความเป็นกรด (Total Acid Number)

การวัดปริมาณกรดที่เกิดขึ้นในน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน ค่าความเป็นกรดจะบ่งบอกถึงปริมาณของสารประกอบที่เป็นกรดในน้ำมันหล่อลื่น โดยทั่วไปมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือการปนเปื้อนของสารต่าง ๆ ในระบบเครื่องยนต์ เช่น กรดอินทรีย์หรือสารปนเปื้อนจากเชื้อเพลิง การเพิ่มขึ้นของค่า TAN เป็นสัญญาณว่าน้ำมันกำลังเสื่อมสภาพ และอาจไม่สามารถทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ค่าความเป็นกรด (TAN) จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้น้ำมันนาน ๆ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าน้ำมันกำลังเสื่อมสภาพ หากค่า TAN สูงมาก ควรเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์จากการกัดกร่อน

8. โลหะสึกหรอ (Wear Metal)

โลหะการสึกหรอในบริบทของการหล่อลื่นในเครื่องยนต์หมายถึงโลหะที่หลุดออกมาจากชิ้นส่วนเครื่องยนต์ระหว่างการทำงาน ซึ่งเกิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ลูกสูบ, แบริ่ง, เพลา ลูกเบี้ยว, หรือส่วนอื่น ๆ ที่สัมผัสกันระหว่างการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์ Wear Metal ที่หลุดออกมามักจะถูกปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น และเป็นตัวบ่งชี้ถึงการสึกหรอของเครื่องยนต์และความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ การทดสอบปริมาณ Wear Metal ในน้ำมันหล่อลื่นมักดำเนินการโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีต่าง ๆ ซึ่งสามารถตรวจหาปริมาณและชนิดของโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำมัน ตัวอย่างของมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่

1. ASTM D5185 มาตรฐานนี้ใช้เทคโนโลยี Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) ในการวิเคราะห์และตรวจหาปริมาณของโลหะที่สึกหรอ เช่น เหล็ก, ทองแดง, ตะกั่ว, อลูมิเนียม และโลหะอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น การทดสอบ

นี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณโลหะได้หลายชนิดในเวลาเดียวกันด้วยความแม่นยำสูง ซึ่งช่วยให้ทราบถึงการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ASTM D6595 มาตรฐานนี้ใช้วิธี Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry (RDE-AES) ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะสึกหรอและสารปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นวิธีการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบปริมาณโลหะ เช่น เหล็ก, ตะกั่ว, ทองแดง, และโลหะอื่น ๆ ที่เกิดจากการสึกหรอของเครื่องยนต์

ตารางที่ 2.2 แสดงถึงโลหะสึกหรอหลักที่สามารถพบได้ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์จากการตรวจวิเคราะห์ โดยโลหะแต่ละชนิดเกิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ทำจากโลหะชนิดนั้น ๆ หรือมีการเคลือบผิวด้วยโลหะเหล่านี้ในการลดแรงเสียดทาน

ตารางที่ 2.2 โลหะสึกหรอที่สามารถพบได้ในเครื่องยนต์

เหล็ก (Fe)	เพลาลูกเบี้ยว, วาล์ว, แหวนลูกสูบ, เกียร์	เหล็กพบมากในเครื่องยนต์และระบบเกียร์ สึกหรอจากการเคลื่อนไหวและแรงเสียดทาน
อลูมิเนียม (Al)	ลูกสูบ, ผนังกระบอกสูบ, ฝาสูบ	การสึกหรอของลูกสูบและผนังกระบอกสูบเกิดจากการเคลื่อนที่ภายในกระบอกสูบ
ทองแดง (Cu)	แบร็ง, บูช, เฟลาข้อเหวี่ยง	การสึกหรอจากการหมุนและแรงเสียดทานในแบร็งและบูชต่าง ๆ
ตะกั่ว (Pb)	แบร็ง, บูช	ใช้ในแบร็งเป็นส่วนผสมในโลหะผสมเพื่อลดการสึกหรอจากแรงกดสูง
โครเมียม (Cr)	แหวนลูกสูบ, วาล์ว	การสึกหรอจากแหวนลูกสูบและวาล์วที่ใช้เคลือบด้วยโครเมียมเพื่อลดการเสียดทาน
นิกเกิล (Ni)	เทอร์โบชาร์จเจอร์, ชิ้นส่วนเหล็กอัลลอย	นิกเกิลพบในชิ้นส่วนที่มีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการสึกหรอ

ตารางที่ 2.2 โลหะสีกรหรือที่สามารถพบได้ในเครื่องยนต์ (ต่อ)

ดีบุก (Sn)	แบร็ง	เป็นส่วนประกอบในโลหะผสมของแบร็ง เพื่อลดการสีกรหรือ
แมงกานีส (Mn)	เพลาช้อเหวียง, แบร็ง, เกียร์	สีกรหรือในชิ้นส่วนที่ต้องรับความดันและแรงเสียดทานสูง
ซิลิกอน (Si)	วัสดุผนัง, ฝาสูบ	พบในกรณีที่มีการปนเปื้อนจากสารกันรั่วและซีลภายในเครื่องยนต์
โมลิบดีนัม (Mo)	แหวนลูกสูบ, บุษ	ใช้ในแหวนลูกสูบและบุษเพื่อลดการเสียดทานและการสีกรหรือ

9. การต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน (Anti-Oxidation)

การทดสอบ Anti-oxidation ของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน ASTM มักใช้ในการประเมินความสามารถของน้ำมันในการทนต่อการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของเครื่องยนต์ มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติ Anti-oxidation มีหลายมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำมันหล่อลื่นและสภาวะการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D7414 ซึ่งใช้สำหรับการตรวจสอบการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันหล่อลื่นปิโตรเลียมและไฮโดรคาร์บอนที่กำลังใช้งาน เช่น น้ำมันเครื่องดีเซล น้ำมันไฮดรอลิก และน้ำมันเกียร์ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fourier Transform Infrared Spectrometry (FT-IR) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสเปกโทรสโกปีแบบอินฟราเรด การทดสอบนี้เป็นการวัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเกิดออกซิเดชัน เช่น อัลดีไฮด์, คีโตน, เอสเทอร์ และกรดคาร์บอกซิลิก ที่มีผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ทำให้เกิดปัญหาหลายอย่าง เช่น การเพิ่มความหนืด การกัดกร่อน และการก่อตัวของตะกอนที่อาจทำให้เครื่องยนต์ทำงานไม่ปกติได้ มาตรฐานนี้ใช้ทั้งวิธีการวิเคราะห์แบบเทรนด์โดยตรง (Direct Trend Analysis) และแบบลบสเปกตรัมอ้างอิง (Differential Trend Analysis) ซึ่งสามารถนำไปใช้เพื่อเฝ้าระวังการเสื่อมสภาพของน้ำมันและบ่งบอกถึงสถานะการทำงานของเครื่องจักรได้

10. ปฏิกิริยาไนเตรชัน (Nitration)

คือการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์ ปฏิกิริยาไนเตรชันนี้มักพบในเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนักหรือในสภาวะที่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยสาร NO_x ที่เกิดขึ้นจะปนเปื้อนเข้ากับน้ำมันหล่อลื่น ทำให้เกิดสารประกอบไนโตรเจน เช่น ไนไตรต์ (NO₂) และไนเตรต (NO₃) สารประกอบเหล่านี้สามารถเร่งการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น ทำให้เกิดความเปราะ และส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนและการสะสมของตะกอนที่เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ การทดสอบปฏิกิริยาไนเตรชันในน้ำมันหล่อลื่นมักดำเนินการ

ตามมาตรฐาน ASTM D7624 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้เทคโนโลยี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์และวัดปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหล่อลื่น โดยการวัดความดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับสารไนโตรเจนออกไซด์ ผลการทดสอบนี้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเกิดไนโตรเจนในเครื่องยนต์และความเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

11. เขม่า (Soot)

เขม่าในน้ำมันหล่อลื่น หมายถึงอนุภาคของคาร์บอนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ภายในเครื่องยนต์ โดยเฉพาะในเครื่องยนต์ดีเซล การสะสมของเขม่ามักเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลที่มีส่วนผสมของกำมะถันและเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ เขม่าเหล่านี้สามารถปนเปื้อนเข้ามาในน้ำมันหล่อลื่นเมื่อทำงานในสภาวะที่มีการเสียดสีสูงหรือเมื่อเกิดการรั่วของซีลเครื่องยนต์

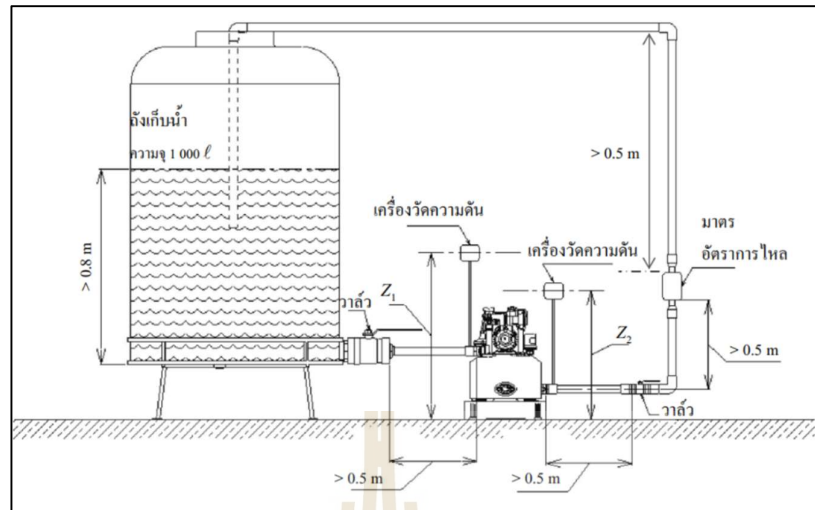
2.5 ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump)

2.5.1 หลักการพื้นฐานในการทดสอบปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) ทำงานโดยใช้หลักการของแรงเหวี่ยงเพื่อเพิ่มความดันของของเหลว เมื่อของเหลวถูกดูดเข้าทางด้านกลางของใบพัด (Impeller) ที่หมุนด้วยความเร็วสูง จะเกิดแรงเหวี่ยงทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ออกไปสู่ขอบนอกของใบพัดอย่างรวดเร็ว แรงเหวี่ยงนี้ทำให้ของเหลวมีพลังงานจลน์สูงขึ้น เมื่อออกจากใบพัดของเหลวจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนโครงปั๊ม (Casing) ที่ออกแบบให้เปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานศักย์ในรูปของความดัน เมื่อของเหลวถูกปล่อยออกจากปั๊ม ความดันที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้ของเหลวเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการได้ ปั๊มประเภทนี้นิยมใช้ในงานที่ต้องการส่งของเหลวปริมาณมากที่มีความดันปานกลางถึงสูง เช่น งานสูบน้ำในระบบอุตสาหกรรมและระบบน้ำประปา

การกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับ เครื่องสูบน้ำไฟฟ้าแบบหมุนเหวี่ยงดูทางเดียว โดยเฉพาะในด้าน คุณลักษณะที่ต้องการด้านประสิทธิภาพพลังงาน ภายใต้หมายเลขมาตรฐาน มอก. 2618-2557 มาตรฐานนี้ยังอธิบายถึงนิยามที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องสูบน้ำ เช่น ความเร็วเฉลี่ย, เฮดน้ำ, ความดัน, และประสิทธิภาพโดยรวม รวมถึงข้อกำหนดที่ต้องมีการทดสอบก่อนที่จะออกวางจำหน่าย การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแสดงดัง **รูปที่ 2.4** ซึ่งมีสมการควบคุมประกอบด้วย

2.5.1.1 สมการอนุรักษ์พลังงานโดยถือว่าการไหลในท่อเป็นการไหลแบบ 1 มิติ และไม่คำนึงถึงความสูญเสียในตัวปั๊มแสดงดัง **สมการ 2.7**



รูปที่ 2.4 การออกแบบและการจัดวางปั้มน้ำเพื่อการทดสอบระยะยาวตามมาตรฐาน มอก. 2618-2557 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2557)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_p = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.7)$$

โดย	P_1	คือ	ความดันเกจขาเข้า (Pa)
	P_2	คือ	ความดันเกจขาออก (Pa)
	v_1	คือ	ความเร็วของน้ำขาเข้า (m/s)
	v_2	คือ	ความเร็วของน้ำขาออก (m/s)
	z_1	คือ	ความสูงจากเกจวัดที่ความดันขาเข้าเทียบกับพื้น (m)
	z_2	คือ	ความสูงจากเกจวัดที่ความดันขาออกเทียบกับพื้น (m)
	H_p	คือ	เฮดรวมของปั้มน้ำ (m)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m ³)
	g	คือ	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ²)

จัดรูปสมการ 2.8 ใหม่เพื่อหาค่าตัวแปร H_p จะได้ว่า

$$H_p = \frac{(P_2 - P_1)}{\rho g} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (z_2 - z_1) \quad (2.8)$$

หรือ $H_p = h_d - h_s \quad (2.9)$

$$h_d = \frac{P_d}{\rho g} + \frac{v_d^2}{2g} + z_d \quad (2.10)$$

$$h_s = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + z_s \quad (2.11)$$

โดย h_d คือ เฮดความสูญเสียทางด้านขาออกปั๊ม (m)

h_s คือ เฮดความสูญเสียทางด้านขาเข้าปั๊ม (m)

2.5.1.2 สมการการไหลต่อเนื่อง

สมการการไหลต่อเนื่องเป็นสมการพื้นฐานในวิชากลศาสตร์ของไหลที่อธิบายการคงสภาพของมวล (Mass Conservation) โดยใช้กับของไหลที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง สมการนี้ระบุว่าปริมาตรของไหลขาเข้าต้องเท่ากับปริมาตรของของไหลขาออก อัตราการไหลของน้ำหาได้จาก **สมการ 2.12** สมการนี้บ่งบอกว่าเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดต่างกัน ความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่หน้าตัด หากท่อมีพื้นที่เล็กลง ของไหลจะไหลเร็วขึ้นในทางกลับกัน หากพื้นที่ใหญ่ขึ้น ของไหลจะไหลช้าลง

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2.12)$$

โดย A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดท่อขาเข้าปั๊ม (ตารางเมตร, m^2)

A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดท่อขาออกปั๊ม (ตารางเมตร, m^2)

V_1 คือ พื้นที่หน้าตัดท่อขาเข้าปั๊ม (m/s)

V_2 คือ พื้นที่หน้าตัดท่อขาออกปั๊ม (m/s)

2.5.1.3 ประสิทธิภาพของปั๊ม (Pump Efficiency)

เป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของปั๊มในการเปลี่ยนพลังงานจากต้นกำลัง (เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า) ไปสู่ของเหลวที่ถูกสูบ โดยปกติแล้วจะถูกแสดงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ ยิ่งค่าประสิทธิภาพสูงเท่าไร ปั๊มก็จะยิ่งทำงานได้ดีมากขึ้นเท่านั้น เพราะมีการสูญเสียพลังงานในระบบน้อยลง สมการการคำนวณประสิทธิภาพของปั๊มน้ำ สามารถคำนวณได้ดัง **สมการ 2.13**

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\rho Q g H_p}{T \omega} \cdot 100 \quad (2.13)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของปั๊มน้ำ (%)

H_S คือ เฮดการสูญเสียรวมของระบบ (m)

P_{out} คือ พลังงานที่ส่งผ่านไปยังของเหลว (กำลังของปั๊ม) $P_{out} = \rho Q g H_p$ (W)

P_{in} คือ กำลังที่จ่ายให้แก่ปั๊มน้ำ $P_{in} = T \omega$ (W)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม $= \frac{2\pi N}{60}$ เมื่อ N คือความเร็วรอบเครื่องยนต์ (rpm)

2.5.2 ความสูญเสียในระบบท่อ

สมการอนุรักษ์พลังงาน และ ความสูญเสียในท่อ มีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เนื่องจากความสูญเสียในระบบท่อเป็นส่วนหนึ่งที่เกิดการสูญเสียพลังงานภายในระบบ โดยสามารถอธิบายได้ผ่าน สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) ซึ่งเป็นหนึ่งในสมการอนุรักษ์พลังงานที่ใช้ในวิชากลศาสตร์ของไหล สมการเบอร์นูลลีเป็นการแสดงการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งแสดงดัง **สมการ 2.14** โดยระบุว่าพลังงานรวมที่มีอยู่ในของเหลว ณ จุดหนึ่งจะถูกถ่ายโอนไปยังอีกจุดหนึ่ง และหากมีความสูญเสียในระบบท่อ เช่น การเสียดทานในผิวท่อหรือความสูญเสียรองที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระบบท่อ ก็จะทำให้พลังงานที่ได้รับจากปั๊มหรือระบบอื่น ๆ ลดลง

2.5.2.1 สมการการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_p = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{loss} \quad (2.14)$$

โดยที่ P_1 คือ ความดันเกจขาเข้าปั๊ม (Pa)

P_2 คือ ความดันเกจขาออกปั๊ม (Pa)

v_1 คือ ความเร็วของน้ำขาเข้าปั๊ม (m/s)

v_2	คือ ความเร็วของน้ำขาออกปั๊ม (m/s)
z_1	คือ ความสูงจากगेजวัดความดันขาเข้าเทียบกับพื้น (m)
z_2	คือ ความสูงจากगेजวัดความดันขาออกเทียบกับพื้น (m)
ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
H_p	คือ เฮดรวมของปั๊มน้ำ (m)
h_{loss}	คือ เฮดการสูญเสียรวม (เฮดการสูญเสียหลัก+เฮดการสูญเสียรอง) (m)

พลังงานที่สูญเสียไปเมื่อของเหลวไหลผ่านระบบท่อ ความสูญเสียเหล่านี้เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานและการเปลี่ยนแปลงทิศทางหรือขนาดของการไหล ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความดัน ความเร็ว หรือพลังงานศักย์ของของเหลว ความสูญเสียในระบบท่อสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

2.5.2.1 เฮดการสูญเสียหลัก

เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวกับผิวของท่อระหว่างการไหล ความสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับ ความยาวของท่อ (ยิ่งท่อยาว ความสูญเสียก็ยิ่งมาก) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (ท่อแคบกว่ามีความสูญเสียมากกว่า) ลักษณะของการไหล (แบบราบเรียบหรือปั่นป่วน) และ ลักษณะพื้นผิวภายในท่อ (ยิ่งหยาบ ความสูญเสียก็ยิ่งมาก) สมการที่ใช้ในการคำนวณความสูญเสียหลักเรียกว่า สมการดาร์ซี-ไวส์บาค (Darcy-Weisbach equation) แสดงดัง สมการ 2.15

$$h_L = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2.15)$$

โดย	h_L	คือ เฮดความสูญเสียหลัก (m)
	f	คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Darcy-Weisbach friction factor)
	l	คือ ความยาวของท่อ (m)
	d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
	v	คือ ความเร็วของของไหลภายในท่อ (m/s)
	g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Darcy-Weisbach friction factor) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรหลัก ๆ ดังนี้

- เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)
เลขเรย์โนลด์เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของการไหล ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล, เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, ความหนืด และความหนาแน่นของของไหล แสดงดังสมการ 2.16
- ลักษณะการไหล (Flow Regime) ถูกแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่
 - การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) เมื่อเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) น้อยกว่า 2000 การไหลเป็นแบบราบเรียบ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการ 2.17
 - การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เมื่อเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4000 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับทั้งความขรุขระสัมพัทธ์ของท่อและเลขเรย์โนลด์ แสดงดังสมการ 2.18
- ความขรุขระสัมพัทธ์ (Relative Roughness):
ความขรุขระของผิวท่อ (epsilon, ϵ) มีผลต่อการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่ผิวขรุขระจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าท่อที่ผิวเรียบ คำนี้นับจากสัดส่วนของความขรุขระสัมบูรณ์ (ϵ) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) หรือ ϵ / D แสดงดังตารางที่ 2.5

เรย์โนลด์นัมเบอร์;
$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \text{ หรือ } Re = \frac{v d}{\nu} \quad (2.16)$$

โดยที่ Re คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ (m/s)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

μ คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของการไหล Dynamic Viscosity ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)

ν คือ ค่าความหนืดจลนศาสตร์ Kinematics Viscosity (m^2/s)

$$\text{ค่า } f \text{ กรณี } Re < 2,300; \quad \text{ค่า } f = \frac{64}{Re} \quad (2.17)$$

$$\text{ค่า } f \text{ กรณี } Re > 2,300; \quad \text{ค่า } \frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (2.18)$$

ในกรณีท่อที่ใช้ไม่ใช่ท่อกลม สามารถหาเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกแสดงดัง สมการ 2.19

$$d_h = \frac{4A}{P} \quad (2.19)$$

โดยที่	ε	คือ ความขรุขระของผิวท่อ (m)
	d	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
	ε/d	คือ ค่าความขรุขระสัมพัทธ์
	d_h	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหลภายในท่อ (m ²)
	P	คือ เส้นรอบรูปเปียกของเหลว Wetted Perimeter (m)

ตารางที่ 2.3 ค่าความขรุขระของผิวท่อในเชิงพาณิชย์ (สุเทพ แก้วนัย, 2554)

ค่าความขรุขระของผิวท่อ		
ประเภทท่อ	ความขรุขระ (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอน (%)
เหล็กแผ่น	0.05	±60
เหล็กกล้า	0.002	±50
เหล็กในทางการค้าทั่วไป	0.046	±30
ตะเข็บ	3.0	±70
เหล็กขึ้นสนิม	2.0	±50
เหล็กหล่อ	0.26	±50
เหล็กพืด	0.046	±20
ชุบสังกะสี	0.15	±40
เคลือบยางมะตอย	0.12	±50
ทองเหลือง	0.002	±50
พลาสติก	0.0015	±60
คอนกรีต (ผิวเรียบ)	0.04	±60
คอนกรีต (ผิวหยาบ)	2.0	50
ยาง	0.01	40

2.5.2.2 เหตุการณ์สูญเสียรอง

เกิดขึ้นที่จุดต่าง ๆ ในระบบท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพ เช่น การเปลี่ยนทิศทางการไหล (โค้ง, ข้องอ), การเปลี่ยนขนาดของท่อ (ขยายหรือหดลง), การไหลผ่านวาล์วหรือข้อต่ออื่น ๆ ความสูญเสียรองมักจะคำนวณโดยใช้ สมการ 2.20

$$h_m = \frac{Kv^2}{2g} \quad (2.20)$$

โดยที่ h_m คือ การสูญเสียรอง

K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของอุปกรณ์ใด ๆ

2.6 ปาล์มไบโอดีเซล

แนวโน้มราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่เพิ่มสูงขึ้นและกระแสความต้องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจึงเป็นสาเหตุให้มีการค้นคว้าวิจัยด้านพลังงานทดแทน ไบโอดีเซลเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากมีอัตราส่วนการผลิตต่อไร่ที่สูง อีกทั้งยังเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย การนำปาล์มมาผลิตเป็นไบโอดีเซลจะส่งเสริมช่วยให้ราคาปาล์มสูงขึ้น แต่ถ้าหากนำปาล์มที่ผลิตได้มาทำไบโอดีเซลจนหมดจะทำให้เกิดความผันผวนของราคาน้ำมันพืชในตลาด การผลิตไบโอดีเซลเพื่อนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมจึงนำส่วนของผลผลิตที่เหลือจากการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งจะช่วยสร้างสมดุลระหว่างการนำผลผลิตทางการเกษตรไปผลิตอาหารและพลังงาน จากข้อมูลกระทรวงพลังงานในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2565 มีการใช้น้ำมันไบโอดีเซลปริมาณ 1,065 ktoe เทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็น 1.39% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเติมไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วน 10% [กรมธุรกิจพลังงาน, 2563] เนื่องจากประเทศไทยได้เปลี่ยนมาใช้มาตรฐานรถยนต์ยูโร 4 จึงมีการควบคุมปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซลให้ต่ำลงเนื่องจากปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซลมากเมื่อเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีผลอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ แต่การลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซลก็ส่งผลเสียคือน้ำมันเชื้อเพลิงจะสูญเสียคุณสมบัติการหล่อลื่นไปเนื่องจากกำมะถันเป็นสารหล่อลื่นโดยธรรมชาติในน้ำมันดีเซลซึ่งจะส่งผลเสียให้กับระบบจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงจึงต้องมีการปรับปรุงและแก้ไขคุณสมบัติที่สูญเสียไปโดยการเติมไบโอดีเซลซึ่งมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี

เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) ซึ่งมักเรียกกันว่าไบโอดีเซล ได้มาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีจึงมีลักษณะเหมือนสารเติมแต่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน ไบโอดีเซลมีอะตอมออกซิเจนที่มีอยู่ในกรดไขมันของไบโอดีเซลซึ่งทำให้เกิดชั้นในสารประกอบ [Knothe et al, 2005], [Lapuerta et al, 2016] การผสม FAME ลงในเชื้อเพลิงดีเซลกำมะถันต่ำเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูคุณสมบัติการหล่อลื่น การเติมนี้ช่วยให้คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลกำมะถันต่ำมีการหล่อลื่นตามข้อกำหนด [Lapuerta, 2014] แม้การเติม FAME ในปริมาณ 5% โดยปริมาตรก็สามารถสร้างฟิล์มหล่อลื่นที่แข็งแรงและคงทนได้ซึ่งช่วยลดแรงเสียดทานได้อย่างมีนัยสำคัญและป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างโลหะกับโลหะภายในพื้นผิวคู่กัน [Sulek et al, 2010] ที่น่าสนใจคือ ในการทดสอบการหล่อลื่นของน้ำมันดีเซลชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันดีเซลสวีเดน MK1 และน้ำมันแก๊สต่อของเหลว (GTL) ปริมาณ FAME ที่เหมาะสมที่ทำให้คุณสมบัติหล่อลื่นผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะอยู่ที่ 10% โดยปริมาตร [Sukjit et al, 2011], [Sukjit et al, 2012] สัดส่วนนี้มีส่วนช่วยป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์ดีเซลสมัยใหม่ที่ใช้ปั๊มเชื้อเพลิงความดันสูง ดังนั้น จึงจำเป็นที่เชื้อเพลิงจะต้องมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี

M.W. Sulek (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการสึกหรองของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ได้จากเมล็ดเรพชิต (Rape Seed) ทดสอบโดยใช้เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไบโอดีเซลเป็นผลให้ค่าความต้านทานการเคลื่อนที่และความหยาบของผิวลดลงตามปริมาณไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น และการผสมไบโอดีเซลอย่างน้อย 5-10% ส่งผลให้แรงเสียดทานลดลง 20 % และลดการสึกหรอบนชิ้นงานทดสอบได้ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับการสึกหรอภายใต้การหล่อลื่นของน้ำมันดีเซล

Gerhard Knothe (2005) ได้ศึกษาอิทธิพลของกรดไขมันต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลพบว่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลได้รับอิทธิพลอย่างมากจากคุณสมบัติของกรดไขมันแต่ละตัวในไบโอดีเซลโดยมีผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เช่น ตัวเลขซีเทนที่มีความสัมพันธ์กับการเผาไหม้และการปล่อยไอเสีย จุดจุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Clod flow) เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability) ความหนืด (Viscosity) และค่าคุณสมบัติการหล่อลื่น (lubricity)

Deniel P. Geller (2004) ได้ศึกษาผลกระทบของกรดไขมันในไบโอดีเซลต่อการหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง High Frequency Reciprocating Rig (HRFF) โดยใช้ลูกเหล็กถูกับแผ่นดิสก์ซึ่งถูกแช่อยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงลูกบอลและแผ่นดิสก์ถูกทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิ 60 องศาและสัมผัสกัน ทำการทดสอบเป็นเวลา 75 นาที ไปด้วยความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยถลอกพบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนพันธะคู่หรือระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการหล่อลื่นและหมู่ไฮดรอกซิลในกรดริซินอเลอิก (Ricinoleic acid) (C18:1OH) มีประสิทธิภาพในการเพิ่มคุณสมบัติการหล่อลื่นได้ดีส่งผลให้รอยขีดข่วนบนแผ่นดิสก์ลดลง

Atul Dhar (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของน้ำมันไบโอดีเซลคารันจา (Karanja) ต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซล โดยเครื่องยนต์ที่ใช้เป็นเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะ ขนาดความจุกระบอกสูบ 2.52 ลิตร ชิ้นส่วนที่ทำการวัดการสึกหรอ ได้แก่ ลูกสูบ วัดระยะห่างของหัววาล์ว ช่องว่างแหวน เส้นผ่านศูนย์กลางข้อเหวี่ยง เส้นผ่านศูนย์กลางของสลักสูบ โดยสัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้คือ 20% ทำการทดสอบระยะยาว 250 ชั่วโมง พบว่า มีคราบเขม่าคาร์บอนเกาะติดที่บริเวณด้านบนลูกสูบและที่ปลายหัวฉีดมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล การสึกหรอของวาล์ว ลูกสูบ แหวนลูกสูบ สลักสูบ และแบริ่ง พบว่ามีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล

Stanislav Pehan (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของไบโอดีเซลจากเรพชิตต่อคุณลักษณะการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซล โดยเครื่องยนต์ที่ใช้เป็นเครื่องยนต์ดีเซล 6 สูบ 4 จังหวะ กำลังเครื่องยนต์สูงสุดอยู่ที่ 162 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบต่อนาที โดยทำการตรวจสอบความสามารถในการหล่อลื่นน้ำมันเชื้อเพลิงต่อระบบจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ทำการทดสอบระยะยาว 110 ชั่วโมง โดยใช้ น้ำมันไบโอดีเซลจากเรพชิต พบว่า การใช้ไบโอดีเซลจะเพิ่มความหยาบของผิวของ

ปั๊มลูกสูบ คราบเขม่าในห้องเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลจากเรพซีดไม่มีความแตกต่างกับน้ำมันดีเซล การใช้ไบโอดีเซล

Tongchit Suthisripok (2018) ได้ศึกษาผลความทนทานของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้การเกษตร โดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ที่ใช้เป็นเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ กำลังเครื่องยนต์ เท่ากับ 14 แรงม้า ทำการทดสอบโดยการสูบน้ำเป็นระยะเวลา 800 ชั่วโมง ทำการทดสอบต่อเนื่องวัน ละ 12 ชั่วโมง โดยจ่ายโหลดสูงให้กับเครื่องยนต์อย่างต่อเนื่อง ชิ้นส่วนที่ตรวจสอบการสึกหรอ ได้แก่ ระบบจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ฝาสูบ วาล์วไอดี วาล์วไอเสีย และลูกสูบ ทำการเก็บตัวอย่างและเปลี่ยน น้ำมันเครื่องทุก ๆ 100 ชั่วโมง ผลการเก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่องพบว่า ค่าความหนืดของน้ำมันลดลง เป็นผลมาจากการปนเปื้อนของโลหะและอโลหะส่งผลให้ชั้นฟิล์มน้ำมันบางลง แต่การสึกหรออยู่ตาม เกณฑ์ปกติเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล สรุปได้ว่า น้ำมันไบโอดีเซล B100 สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับ เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กได้

2.7 Bio-Hydrogenated Diesel (BHD)

กระบวนการไฮโดรจิเนชันในน้ำมันพืชเป็นกระบวนการทางเคมีที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรม ต่าง ๆ กระบวนการนี้ทำการเติมก๊าซไฮโดรเจนลงในไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถสลายพันธะคู่ได้ และใน บางกรณีก็ทำให้อะตอมของกำมะถันลดลงด้วย [Farooqui et al, 2022] กระบวนการนี้ได้ถูกนำมาใช้ ในด้านพลังงานหมุนเวียนและการผลิตเชื้อเพลิง การใช้งานที่น่าสนใจอย่างหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการ ไฮโดรจิเนชันคือการผลิตน้ำมัน BHD หรือที่รู้จักกันในชื่อน้ำมันพืชที่ผ่านการไฮโดรทรีต (HVO) น้ำมัน เชื้อเพลิงนี้ได้มาจากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการไฮโดรจิเนชันซึ่งเป็นทางเลือกที่ช่วยลดการใช้ น้ำมัน ดีเซลแบบเดิม วิธีการทำไฮโดรจิเนชันน้ำมันพืชทำให้พันธะคู่จะสลายตัวไปทำให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ค่าซีเทนที่สูงขึ้นและมีการปล่อยมลพิษที่ลดลง เช่น กำมะถันและสารอะโรมาติก สิ่งที่น่าสนใจ สำหรับเชื้อเพลิงหมุนเวียนนี้คือสามารถใช้งานได้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่ได้มีการดัดแปลงได้ดี ซึ่งถือเป็นวิธีแก้ปัญหาดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่ยั่งยืน อย่างไรก็ตาม น้ำมันที่ได้จากกระบวนการ ไฮโดรจิเนชันนี้ยังพบข้อเสียอยู่เนื่องจากกระบวนการไฮโดรจิเนชันทำให้โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน พืชเปลี่ยนแปลงไป เชื้อเพลิงที่ได้จึงอาจแสดงคุณสมบัติในการหล่อลื่นที่ลดลง [Fathurrahman et al, 2023] ด้วยเหตุนี้การนำไปใช้ในเครื่องยนต์โดยตรงอาจก่อให้เกิดความกังวลในด้านสมรรถนะของ เครื่องยนต์เนื่องจากคุณสมบัติการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดแรงเสียดทาน และการสึกหรอภายในส่วนประกอบของเครื่องยนต์ ดังนั้นนักวิจัยและผู้ผลิตเครื่องยนต์จึงต้องร่วมกัน คิดค้นวิธีการเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติที่สูญเสียไปนี้ วิธีแก้ปัญหาคือเป็นไปได้ อาจมีการใช้สารเติมแต่งหรือน้ำมันที่มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีเข้าไปผสมเพื่อให้คุณสมบัติการหล่อลื่นที่สูญเสียไปกลับมาและใช้ งานในเครื่องยนต์ได้อย่างไม่มีปัญหา

การศึกษาก่อนหน้านี้ได้ศึกษาการใช้น้ำมัน BHD ซึ่งช่วยลดการปล่อยมลพิษจากเครื่องยนต์ได้อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NOx), อนุภาคคาร์บอนขนาดเล็ก (PM), ไฮโดรคาร์บอน (HC) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) [No et al, 2014] อย่างไรก็ตามข้อเสียของน้ำมัน BHD มีข้อเสียคือมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ต่ำ [Fathurrahman et al, 2023]

Magin Lapuerta (2011) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีเมื่อผสมน้ำมัน HVO กับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 10, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 75% โดยปริมาตร จากผลการทดสอบพบว่าข้อจำกัดหลักจะถูกกำหนดโดยค่าการหล่อลื่นและค่าซีเทน และในกรณีที่ใช้น้ำมันที่อากาศเย็นจะถูกจำกัดด้วยคุณสมบัติ Cold Flow ความสัมพันธ์ระหว่างการหล่อลื่นและค่าซีเทนจะนำไปสู่คำแนะนำการผสมน้ำมัน HVO ในสัดส่วนต่ำจนถึงปานกลางและไม่แนะนำให้ผสมน้ำมัน HVO สูงกว่า 50% ค่าการสึกหรอ (Wear) ของ HVO สูงเนื่องจาก HVO ถูกกำจัดออกซิเจนในกระบวนการ Hydrodeoxygenation ทำให้ไม่มีพันธะคู่และการที่น้ำมัน HVO ไม่มีสาร Aromatic และ Olefinic ซึ่งสองตัวนี้จะช่วยในการหล่อลื่น (แต่ถ้ามีมากจะทำให้การเผาไหม้ไม่ดีเนื่องจากต้องใช้พลังงานในการสลายตัวที่สูง)

Yanyong Liu (2012) บทความนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการผลิตน้ำมัน BHD จากวัตถุดิบน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและศึกษากระบวนการปรับปรุงน้ำมัน BHD ที่ได้จากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้กระบวนการ Hydrotreatment โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โลหะ Ruthenium เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลักและมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเป็น Al-Polyoxocation-Pillared Mountmorillonite (Al₁₃-Mount) น้ำมันพืชที่ใช้แล้วจะถูกเปลี่ยนเป็น BHD โดยกระบวนการ Hydrotreatment Process โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา Ru ภายใต้เงื่อนไขคือ อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ (Reactor) อยู่ที่ 350 °C ภายใต้ความดัน 2 MPa ที่มีก๊าซ H₂ ร่วมทำปฏิกิริยาใน reactor, ความเร็วของไหลในเตาปฏิกรณ์ Liquid Hourly Space Velocity (LHSV) เท่ากับ 15.2 h⁻¹ และอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและน้ำมัน (H₂/Oil Ratio) เท่ากับ 400 ml/ml โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประมาณ 98.9% wt% จะมีคาร์บอนอยู่ในช่วง C15-C18 มีคุณสมบัติเป็น Iso-Paraffins และ Light Paraffins ซึ่งเป็นคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล และมีจุด Pour Point เท่ากับ -15 °C

Bulin Boonrod (2020) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Parameter ที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตน้ำมัน BHD โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโลหะ Nickel (Ni) และ Silica (SiO₂) ในปฏิกิริยา Deoxygenation, Parameter ที่สนใจได้แก่ ชนิดของตัวทำละลาย, กรด Oleic และกรด Palmitic จากนั้นใช้วิธีการ Box-Behnken Design (BBD) ในโปรแกรม Design Expert (DOE) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้งหมด 3 เงื่อนไขได้แก่ อุณหภูมิ, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณตัวทำละลายโดยใช้สารตั้งต้นจากการคัดเลือกจากการทดลอง จากผลการทดสอบพบว่า BBD ให้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดคือที่ตัวทำละลาย 53 ml, ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.4 กรัม และอุณหภูมิปฏิกิริยา 260 องศา

เซลเซียส Response Surface แสดงให้เห็นว่าการมีตัวทำละลายมีผลมากที่สุดในการบรรดาปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด ตัวแปรอุณหภูมิและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีนัยสำคัญ จุดที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ขอบเขตสูงสุดของการทดสอบ

Magin Lapuerta (2014) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงจาก Crude oil, Biodiesel, Synthetic Diesel (หรือเรียกว่า F-T fuel = Fischer-Tropsch Diesel, FTS= Fischer-Tropsch Synthesis) และน้ำมัน HVO และได้ทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นของสารบริสุทธิ์ชนิดต่าง ๆ เช่น Alcohols และ สารจำพวก Alkanes ทดสอบโดยใช้เครื่อง (High Frequency Reciprocating Rig, HFRR) ทดสอบในสภาวะความดันไอที่แตกต่างกัน วัดคุณสมบัติเพื่อการประเมินผลกระทบของความชื้นในอากาศต่อค่า Wear Scar Diameter (WSD) ซึ่งค่าความชื้นนี้มีผลต่อการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ

Nivin Chacko (2021) บทความนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงมลพิษต่าง ๆ ด้วยการเพิ่มค่าซีเทนในน้ำมันเชื้อเพลิงการศึกษานี้ศึกษาการเพิ่มค่าซีเทนสองแบบคือ การเติมไฮโดรเจนบางส่วน (HB20) และการเติม 2-Ethylhexyl Nitrate (EHN) เพื่อปรับปรุงคุณภาพการเผาไหม้ของส่วนผสมดีเซล-ไบโอดีเซล (B20) ไบโอดีเซลจาก Karanja ที่ใช้นี้จะถูกเติมไฮโดรเจนบางส่วนในเตาปฏิกรณ์ได้น้ำมัน Hydrogenated ออกมา จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง GC ในส่วนของ 2-Ethylhexyl Nitrate (EHN) ถูกเลือกให้เป็นตัวเพิ่มค่า Cetane ผสมในสัดส่วน 2000 ppm จะถูกผสมลงไปในน้ำมัน B20 น้ำมันที่ใช้ในการทดสอบจะมี 4 ชนิดได้แก่ Diesel, HB20, B20 และ B20+EHN ทำการวัดสมรรถนะ, มลพิษ, และคุณลักษณะการเผาไหม้ ผลการทดสอบพบว่าโดยรวมแล้ว การเติมไฮโดรเจนบางส่วนได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากกว่าในการปรับปรุง NO_x, Smoke, Bsfค เมื่อเทียบกับการเติม EHN

Nishant Kumar Singh (2020) ในบทความนี้ วิเคราะห์ประสิทธิภาพและตัวแปรการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Jojoba-Fuel มีการใช้โมเดลการทำนายแบบไฮบริดอัจฉริยะทั้งหมด 3 แบบจำลอง ได้แก่ Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS), ANFIS-Genetic Algorithm (ANFIS-GA) และ ANFIS-Particle Swarm Optimization (ANFIS-PSO) ตัวแปร Input ได้แก่ ความดันหัวฉีด, เวลาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง, สัดส่วนผสมไบโอดีเซลและโหลดของเครื่องยนต์ ในขณะที่ผลการตอบสนอง Output ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ BTE UHC และ NO_x ผลการทำนายจาก Model Hybrid ทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่ามีนัยสำคัญ ในการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองจะพิจารณาค่า MSE RMSE และ R-Square จากผลการทดสอบค่า MSE และ RMSE ของ ANFIS-GA และ ANFIS-PSO นั้นน้อยกว่า ANFIS อย่างไรก็ตามค่า R-Square แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง ANFIS-PSO มีค่าเท่ากับ 0.9825, 0.9877 และ 0.9895 สำหรับ BTE, UHC และ NO_x ตามลำดับแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาโมเดลในทางที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ANFIS ดังนั้น

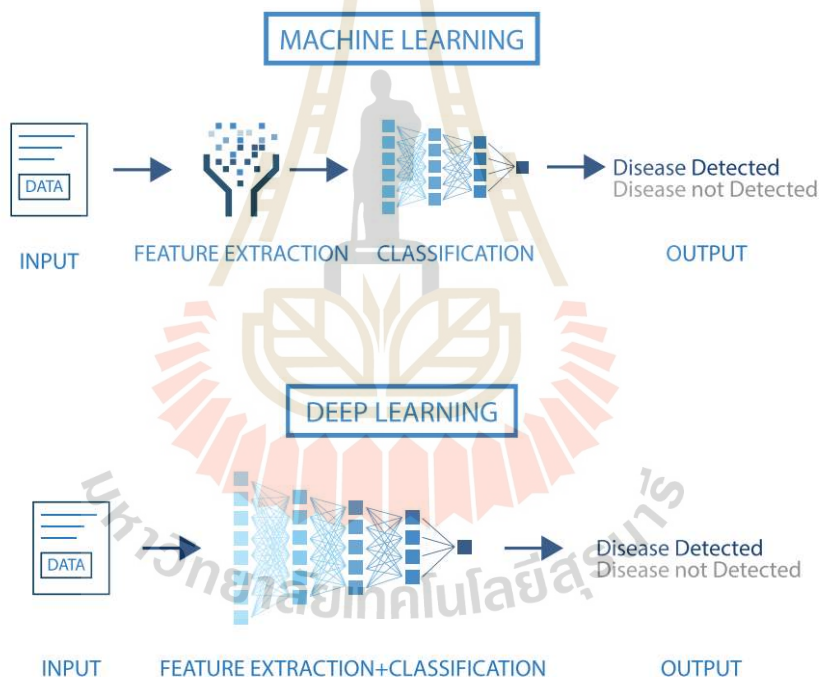
แบบจำลอง ANFIS-PSO แสดงให้เห็นว่าเป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบจำลอง ANFIS และ ANFIS-GA การศึกษาทั้งหมดสรุปได้ว่าแบบจำลองแบบ Hybrid เช่น ANFIS-GA และ ANFIS-PSO เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้สำหรับการประเมินค่า Parameter ไอเสียของเครื่องยนต์อย่างมีประสิทธิภาพ

2.8 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและปัญญาประดิษฐ์

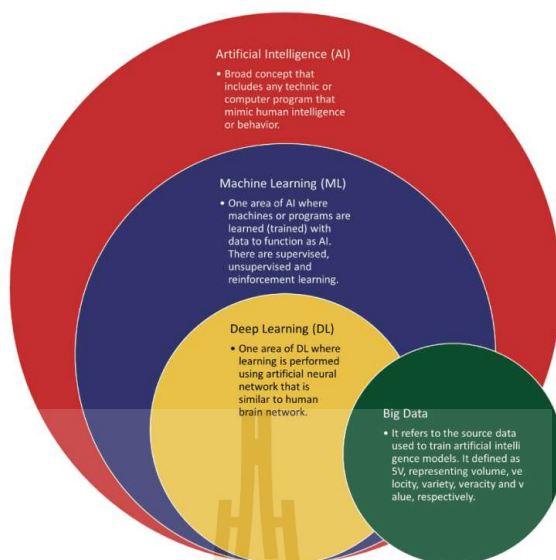
ในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้ประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้หาจุดการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันชนิดต่าง ๆ โดยได้ทำการศึกษาผลกระทบของน้ำมันที่ส่งผลต่อสมรรถนะเครื่องยนต์, คุณลักษณะการเผาไหม้, และมลพิษจากเครื่องยนต์ [Cahyo et al, 2023], [Kaewbuddee et al, 2023] นอกจากนี้เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำมันผสมเหล่านีเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด [Ramesh et al, 2021], [Allami et al, 2023] ในงานด้านเครื่องยนต์มีปัญหาที่ซับซ้อนและมีหลายวัตถุประสงค์ การศึกษานี้จะศึกษาผลกระทบของน้ำมันไบโอดีเซลผสม BHD ต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษและเพื่อให้ได้เงื่อนไขการใช้งานที่เหมาะสมที่สุด โดยส่วนใหญ่แล้วปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมจะเป็นแบบฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ (Many-Objective Functions) สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมใน Many-Objective Functions จะมีหลาย Algorithm ใช้ในการแก้ปัญหา ยกตัวอย่าง เช่น Nondominated Sorting Genetic Algorithm III (NSGA-III) [Li et al, 2022], [Razmi et al, 2022] ซึ่งถูกดัดแปลงแก้ไขมาจาก Algorithm ของ Genetic Algorithm (GA) [Li et al, 2019] [Zhang et al, 2020] หรือจะเป็น Reference Vector Guided Evolutionary Algorithm (RVEA) [Liu et al, 2022], [Wang et al, 2023] ถูกพัฒนามาจากอัลกอริทึม Evolutionary (EAs) เป็นต้น โดย Algorithm เหล่านี้จะถูกใช้ในการหาค่าตอบที่ดีที่สุดออกมา โดยแต่ละ Algorithm จำเป็นจะต้องมีสิ่งที่แสดงพฤติกรรมของเป้าหมายของปัญหา ซึ่งจะถูกเรียกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ในการหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Many-Objective Function นั้นมีความซับซ้อนมาก การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มีบทบาทอย่างมากในการแก้ปัญหาหรือค้นหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงพฤติกรรมของปัญหาทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน [Mozaffar et al, 2022]

คำว่าปัญญาประดิษฐ์ถูกใช้ครั้งแรกเมื่อประมาณ ค.ศ.1956 โดย John Mc-Carth [Russell, 2010] ความหมายของปัญญาประดิษฐ์มีการให้ความหมายและจำกัดความไว้มากมาย แต่มักเกี่ยวข้องกับกระบวนการคิดและการให้เหตุผลโดยมีมนุษย์เป็นต้นแบบ ซึ่งแตกแขนงออกเป็นหลากหลายสาขา เช่น การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP), คอมพิวเตอร์วิชัน (Computer Vision), หุ่นยนต์ (Robotics) และ ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม

ก็ตามเครื่องมือที่สาขาต่าง ๆ เหล่านี้ใช้ในการแก้ไขปัญหาที่ว่ามาดังกล่าวโดยใช้ Machine Learning (ML) อีกชั้นหนึ่งของ ML จะเป็นการเรียนรู้แบบเชิงลึก (Deep Learning: DL) ซึ่งจะมีความแตกต่างกับ ML ตรงที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าหรือมีจำนวน Hidden Layer ที่มากกว่า ML แสดงดัง **รูปที่ 2.5** ความสัมพันธ์ระหว่าง AI, ML และ DL แสดงได้ดัง **รูปที่ 2.6** สำหรับในงานวิจัยนี้การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์จะใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ชื่อว่า Generalized Regression Neural Networks (GRNNs) ในการหาแบบจำลองพฤติกรรมขอตัวแปรที่สนใจ โดยปัจจัย Input ที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบ ได้แก่ สัดส่วนการผสมน้ำมัน Biodiesel ใน BHD, ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM), และโหลดเครื่องยนต์ (%) ซึ่งปัจจัย Output ที่สนใจได้แก่ตัวแปรสมรรถนะประกอบด้วย BSFC, BTE และตัวแปรการปล่อยมลพิษในเครื่องยนต์ ประกอบด้วย HC, CO, NOx, และ Smoke เป็นต้น



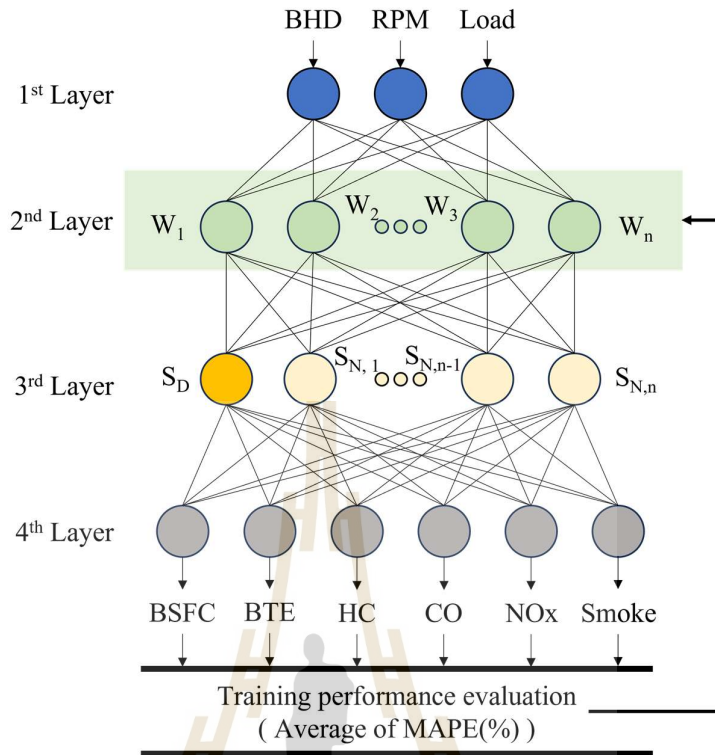
รูปที่ 2.5 แผนภาพการทำงานของ ML และ DL (PROTIMA KHAN, 2021)



รูปที่ 2.6 แผนภาพความสัมพันธ์กันระหว่าง AI, ML, และ DL (YOON GI CHUNG, 2022)

2.8.1 การหาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์โดยใช้ Generalized Regression Neural Networks (GRNNs)

GRNNs จัดเป็น Machine Learning (ML) รูปแบบหนึ่ง โดยทั่วไปแล้ว ML จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ 1. Supervised Learning 2. Unsupervised Learning 3. Reinforcement Learning โดย GRNNs จัดอยู่ในประเภท Supervised Learning ซึ่งเราต้องเป็นคนที่ป้อนข้อมูลให้กับระบบเอง ลักษณะการเรียนรู้ของ GRNNs ถูกดัดแปลงมาจาก Radial Basis Function Network (RBFN) [Ye et al, 2018], [Xue et al, 2022] ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมนี้เป็นการเรียนแบบไปข้างหน้า (Feed Forward) กล่าวคือรับตัวแปร Input เข้ามาแล้วมาคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผล Output โครงสร้างของ GRNNs นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชั้นแสดงดังรูปที่ 2.7 แบบจำลอง GRNNs สามารถอธิบายการทำงานแต่ละชั้นได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอัลกอริทึม Generalized Regression Neural Networks (GRNNs)

ขั้นที่ 1 (Layer 1): ในขั้นนี้จะเป็นชั้นของ Input Layer มีหน้าที่รับข้อมูลเพื่อใช้ในการทำนาย Output โดยข้อมูลที่นำเข้ามาซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นข้อมูลในส่วนของ Training Data Sets จะนำไปคำนวณใน สมการ 2.21

$$D_i = (IN_{EX} - IN_{TR,i})^T \cdot (IN_{EX} - IN_{TR,i}) \quad (2.21)$$

โดยที่: D_i = Difference Value

IN_{EX} = Input จากภายนอกสำหรับการใช้ในการทำนาย ซึ่ง $IN_{EX} = [I_1, I_2, I_3]$

$IN_{TR,i}$ = ข้อมูลจาก Training Data Sets ซึ่ง $IN_{TR,i} = [I_{1,i}, I_{2,i}, I_{3,i}]$

ขั้นที่ 2 (Layer 2): ในขั้นนี้จะเรียกว่า Pattern Layer โดยที่ค่า D_i จะถูกส่งไปคำนวณยังฟังก์ชัน Gaussian Kernel Function ซึ่งเป็นหนึ่งในตระกูลของ Radial Basis Function (RBF)

แสดงดัง **สมการ 2.22** การหาค่าเหมาะสมของตัวแปร Smoothing จะใช้วิธีการ Grid-Search [Chong et al, 2013]

$$W_i = e^{\left(-\frac{D_i}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.22)$$

โดยที่: W_i = Weight of GRNNs

σ = Smoothing Parameter

ชั้นที่ 3 (Layer 3): ในชั้นนี้จะเรียกว่า Summation Layer ค่า Weight และ Neuron ในแต่ละตัวจะถูกคำนวณทางคณิตศาสตร์และมารวมกันใน Layer นี้ โดย Neuron ประเภทแรก คือ Denominator Neuron (S_D) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก **สมการ 2.23** และ Neuron ประเภทที่สอง คือ Numerator Neuron (S_N) สามารถคำนวณได้ดัง **สมการ 2.24**

$$S_D = \sum_{i=1}^n W_i \quad (2.23)$$

$$S_N = \sum_{i=1}^n W_i O_{TR,i,EXP} \quad (2.24)$$

โดยที่: S_D = Denominator Neuron

S_N = Numerator Neuron

$O_{TR,i,EXP}$ = Output Factors ของการทดลอง

ชั้นที่ 4 (Layer 4): ในชั้นนี้จะเรียกว่า Output Layer ซึ่งเป็นชั้นสุดท้ายที่แบบจำลองได้ทำนายค่า Output ออกมาสามารถคำนวณได้จาก **สมการ 2.25**

$$O_{i,GRNNs}(IN_{EX}) = \frac{S_N}{S_D} \quad (2.25)$$

2.8.2 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง GRNNs

ในส่วนนี้ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพารามิเตอร์ อินพุตโดยใช้แบบจำลอง GRNNs เป็นตัวแทนสำหรับฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของ

คำตอบที่สอดคล้องต่อสมรรถนะและการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์มากที่สุด การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่เป็นปัญหาแบบถดถอย (Regression Problem) ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง GRNNs ซึ่งสามารถอธิบายตัวชี้วัดเหล่านั้นได้ดังเอกสารอ้างอิง [Wang et al, 2023]

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) แทนด้วยสัญลักษณ์ R^2 (สมการ 2.26) ซึ่งจะพิจารณาความสอดคล้องกันระหว่างผลลัพธ์การทำนายและข้อมูลจริง โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่าที่ใกล้เคียงกับ 1 บ่งบอกถึงความถูกต้องของการทำนายใกล้เคียงกับค่าจริง และจะพิจารณาร่วมกับค่าผิดพลาดเปอร์เซ็นต์สัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE (%)) (สมการ 2.27) ซึ่งคำนวณได้จากค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ทำนายและค่าจริงแสดงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_{i,EXP} - O_{i,GRNNs})^2}{\sum_{i=1}^n (O_{i,EXP} - \bar{O}_{EXP})^2} \quad (2.26)$$

$$MAPE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{O_{i,EXP} - O_{i,GRNNs}}{O_{i,EXP}} \right|}{n} \times 100 \quad (2.27)$$

โดยที่: R^2 = Coefficient of Determination

$O_{i,EXP}$ = ข้อมูลที่ได้จากการทดลองลำดับที่ i

$O_{i,GRNNs}$ = ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง GRNNs

$\bar{O}_{EXP}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลอง

MAPE = Mean Absolute Percentage Error

n = จำนวนของข้อมูลทั้งหมด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำ AI มาประยุกต์ใช้กับการทำนายประสิทธิภาพเครื่องยนต์ การปล่อยมลพิษ โดยใช้อัลกอริทึมรูปแบบต่าง ๆ แสดงดัง ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ AI กับงานเครื่องยนต์

Fuel	Factors		¹ AF and ² Norm.	³ LF	(Train:Validate: Teat)	Parameter evaluating the ANN model Performance	Reference
	INPUT	OUTPUT					
D80+E10+B10 Bd75+E10+B15	-โหลด, IT ⁴ , IP ⁵ -อัตราการไหล H2	- BTE, EGT - HC, CO, NOx, Smoke	Logsig [-1,1]	Trainlm	N/A	R: EGT=0.995, BSFC=0.98, BTE=0.999, HC=0.985, CO=0.98, CO ₂ =0.999, O ₂ =0.999, NO _x =0.999, Smoke=0.999 MSE: EGT=0.005, BSFC=0.02, BTE=0.001, HC=0.015, CO=0.02, CO ₂ =0.001, O ₂ =0.001, NO _x =0.001, Smoke=0.001	(Prasada Rao K. et. al., 2017)
Diesel, CIME10, CIME15, CIME20, CIME25	-โหลด, IT ⁴ , IP ⁵ -%การผสม น้ำมัน	-BTE, EGT, BSFC -HC, CO ₂ , CO, NO, Dry soot, O ₂	Tansig [-1,1]	Trainlm	70:15:15	R: EGT=0.99956, BSEC=0.99879, BTE=0.99976, UBHC=0.99937, CO=0.99993, CO ₂ =0.99974, O ₂ =0.9991, NO=0.99988, Dry soot=0.99991 MSE: EGT=0.18868, BSEC=0.026495, BTE=0.015232, UBHC=0.019596, CO=0.004762, CO ₂ =0.015843, O ₂ =0.00916, NO=0.010392, Dry soot=0.00536	(Kshiragar CM. et. al., 2016)
Diesel+BD10, Diesel+BD20 Diesel+BD30	-โหลด, IT ⁴ -%การผสม น้ำมัน	-BSFC, BTE, EGT, P _{max} -NOx, HC, Smoke	Tan/lin, Sig/lin [0.1,0.9]	Trainlmdm ,Tranlm	80:0:20	R: EGT=0.99967, BSFC=0.99946, BTE=0.99968, UBHC=0.99991, NO _x =0.99899, Smoke=0.99941, P _{max} =0.99988	(Sharma A. et. al., 2015)

¹AF = Activation function in Hidden Layer

²Norm. = Normalized

³LF = Learning Algorithm

⁵IP = Injection Pressure

⁴IT = Injection Timing

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ AI กับงานเครื่องยนต์ (ต่อ)

Fuel	Factors		¹ AF and ² Norm.	³ LF	(Train:Validate:Test)	Parameter evaluating the ANN model Performance	Reference
	INPUT	OUTPUT					
ไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์ BiodieselB0, B10, B20, ..., B50	- RPM, Torque, Mass Air flow	- CO ₂ , PN, GMD	N/A	N/A	70:15:15	R ² : CO ₂ =0.91, NO _x =0.78, PN in accumulation=0.87, PN in nucleation=0.40, GMD=0.81	(Dominguez-Saez A. et. al., 2018)
ไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดทิ้ง Biodiesel (B5, B20, B50, B100	- กำลังเครื่องยนต์ - %การผสมน้ำมัน	-Torque, BTE -HC, CO ₂ , CO, NO _x	Logsig [0,1]	Trainlm-6, Trainlm-5, Trainscg-8	N/A	RMS: CO=0.030513, CO ₂ =0.021076, UHC=0.116742, NO _x =0.030941, SL=0.038146, BT=0.024242, CP=0.010925, TE=0.027790 R ² : CO=0.992241, CO ₂ =0.998987, UHC=0.929668, NO _x =0.995510, Torque=0.998862, BTE=0.998730	(Canakci M. et. al., 2008)
Diesel B100 จากมะพร้าว, ถั่วเหลือง, ปาล์ม	- RPM, Torque - %การผสมน้ำมัน, อัตราการกินน้ำมัน	-P _{max} HRR _{max} CuHRR	Tansig [-1,1]	Tranlm	70:15:15	R: HC=0.542, CO=0.984, CO ₂ =0.987, NO=0.981, P _{max} =0.985, HRR _{max} =0.977, CuHRR=0.939	(Mohamed Ismail H. et. al., 2012)

¹AF = Activation function in Hidden Layer

²Norm. = Normalized

³LF = Learning Algorithm

⁵IP = Injection Pressure

⁴IT = Injection Timing

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ AI กับงานเครื่องยนต์(ต่อ)

Fuel	Factors		¹ AF and ² Norm.	³ LF	(Train:Validate: Teat)	Parameter evaluating the ANN model Performance	Reference
	INPUT	OUTPUT					
Pongamia Pinnata Biodiesel B20 B100	- Load, -%การผสมน้ำมัน	-BTE, BSEC, EGT -NO _x , Smoke, HC	Tansig [0.1,0.9]	Trainlm	80:0:20	R _{model} =0.99 MSE _{model} =0.002	(Kumar DV. et. al., 2011)
ไบโอดีเซลจากส้ Diesel, OME100, Diesel+OME20	-Load, CR -%การผสมน้ำมัน	- BSFC, BTE - NO _x , HC, CO	Logsig, Tansig [0.1, 0.9]	Trainlm, Trainingda, Trainingdx, Tranrp	70:15:15	R: BSFC=0.99995, BTE=0.99801, NO _x =0.99701, HC=0.96821, CO=0.99303	(Karthickeyan V. et. al., 2017)
B20, B40, B60, B80, B100	-Load, CR, IT, IP -%การผสมน้ำมัน	-BTE, BSFC, EGT -HC, CO ₂ , CO, NO _x , O ₂	Logsig [0,1]	Trainlm	70:15:15	R _{model} = 0.9999	(Channapattana SV. et.al., 2015)
Cottonseed biodiesel, B0, B10, B20, B50	- Load, IP - %การผสมน้ำมัน	- CO, HC, NO _x - P _{max} , BSFC	Logsig, Tansig [0,1]	Trainlm	75:0:25	MEP: CO=8.833, HC=2.9113, NO _x =1.4603, P _{max} =4.6216, BSFC=2.0773 R ² : CO=0.9902, HC=0.999, NO _x =0.9999, P _{max} =0.9979, BSFC=0.9995	(Agbulut U. et. al., 2020)

¹AF = Activation function in Hidden Layer

²Norm. = Normalized

³LF = Learning Algorithm

⁵IP = Injection Pressure

⁴IT = Injection Timing

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย

การใช้น้ำมัน BHD และไบโอดีเซลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ยังมีขีดจำกัดอยู่หลายประการ เช่น คุณสมบัติการหล่อลื่นที่ไม่ดีของ BHD อาจทำให้ความเสียหายให้กับระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ไบโอดีเซลนั้นมีค่าคุณสมบัติด้านการออกซิเดชันที่ต่ำ มีความหนืดที่สูงจึงไม่เหมาะสมกับนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง ทางผู้วิจัยจึงได้เกิดความสนใจในการศึกษา ค้นคว้า และวิจัยเกี่ยวกับการชดเชยคุณสมบัติที่สูญเสียไปของ BHD และไบโอดีเซล โดย BHD มีข้อดีคือมีความต้านทานการออกซิเดชันได้ดี ส่วนไบโอดีเซลมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี เมื่อนำทั้งสองเชื้อเพลิงมาผสมเข้าด้วยกันจะสามารถชดเชยคุณสมบัติที่สูญเสียไปได้

ปาล์มไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมัน BHD ได้เนื่องจากปาล์มไบโอดีเซลมีความหนืดที่สูงและมีค่าคุณสมบัติที่ดีซึ่งจะสามารถชดเชยความหนืดที่ต่ำของน้ำมัน BHD ได้ ซึ่งการนำปาล์มไบโอดีเซลมาใช้เป็นส่วนผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงจะไม่ส่งผลกระทบต่อราคาสินค้าเกษตรสำหรับบริโภคในประเทศ นอกจากนี้ผู้วิจัยทำการทดสอบในด้านต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติพื้นฐานทางเคมี สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การปล่อยมลพิษไอเสีย และคุณสมบัติการหล่อลื่น

การทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานที่สำคัญ เช่น องค์ประกอบทางเคมี ความหนืด และค่าความร้อนจากการเผาไหม้ เป็นต้น ส่วนที่สองทำการศึกษาผลกระทบของน้ำมันไบโอดีเซลต่อคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน BHD ผสมไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ISO 12156-1 ด้วยเครื่อง High Frequency Reciprocating Ring (HFRR) และวิเคราะห์กลไกที่ทำให้เกิดการสึกหรอ (Wear Mechanism) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด รวมถึงการตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานทดสอบ และส่วนที่สามการทดสอบด้วยเครื่องยนต์โดยจะทำการทดสอบสมรรถนะกับเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบยี่ห้อ Kawama 186F ในการพิจารณาการสึกหรอทดสอบโดยวิธีการสูบน้ำเป็นระยะเวลา 200 ชั่วโมง เงื่อนไขการทดสอบหาได้จากจุดตัดกันของกราฟสมรรถนะปั้มน้ำและกราฟเฮดของระบบ เมื่อทดสอบครบ 200 ชั่วโมง ทำการถอดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ได้แก่ ลูกสูบ แหวนลูกสูบ สลักสูบ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง

การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงประกอบด้วย ค่าความหนืด ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ จุดวาบไฟ การกลั่น ดัชนีซีเทน ค่าความร้อนเชื้อเพลิง และคุณสมบัติการหล่อลื่น ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

3.2.1 ความถ่วงจำเพาะและความถ่วงเอพียู

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity (SG)) เป็นกระบวนการที่ใช้วัดความหนักเบาของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเปรียบเทียบกับน้ำที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สามารถทราบถึงคุณภาพของน้ำมันในแง่ของความหนาแน่น การทดสอบนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1298 โดยใช้เครื่องมือ Density API & Specific-Tempering Bath ซึ่งควบคุมอุณหภูมิอย่างแม่นยำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วยการใช้ไฮโดรมิเตอร์ที่มีสเกลระดับ 0.700–1.000 และความละเอียด 0.005 ในการวัดความหนาแน่นของน้ำมันในกระบอกตวง

จากนั้นจึงคำนวณหาความถ่วงเอพียู (API Gravity) ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของน้ำมันว่ามีความเบาหรือหนักเทียบกับน้ำ หากค่าความถ่วงเอพียูสูง แสดงว่าน้ำมันมีความเบาและมีคุณภาพสูงกว่า การวัดจะทำในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ และใช้การจับเวลาเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ

3.2.2 ความหนืดจลนศาสตร์

การทดสอบความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) ของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM D445 เป็นวิธีวัดความต้านทานต่อการไหลของน้ำมันที่อุณหภูมิที่กำหนด โดยใช้เครื่องมือ Viscosity – Kinematic Capillary Tempering Bath ที่ควบคุมอุณหภูมิสูง การทดสอบประกอบด้วยการใช้หลอดแก้วรูเล็กสำหรับวิเคราะห์ความหนืด โดยขायึดหลอดแก้วจะช่วยให้หลอดอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำให้สามารถวัดการไหลของน้ำมันผ่านรูหลอดแก้วได้อย่างแม่นยำ จากนั้นจะใช้นาฬิกาจับเวลาวัดระยะเวลาที่น้ำมันไหลผ่านหลอดเพื่อคำนวณความหนืดจลนศาสตร์ ซึ่งค่าความหนืดนี้มีความสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพการไหลและการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงในสภาวะการใช้งานต่าง ๆ

3.2.3 การกลั่น

การทดสอบอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM D86 เป็นการวิเคราะห์จุดเดือดของน้ำมันเพื่อประเมินคุณภาพและการใช้งานในเครื่องยนต์ ขั้นตอนทดสอบใช้เครื่องมือ Distillation at Atmospheric Pressure DU 4-Economy (Manual) ซึ่งประกอบด้วยขวดการกลั่น กระบอกตวง นาฬิกาจับเวลา เทอร์โมมิเตอร์ และจุกยางซิลิโคน การทดสอบนี้ช่วยระบุการระเหยของน้ำมันในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของน้ำมันในเครื่องยนต์

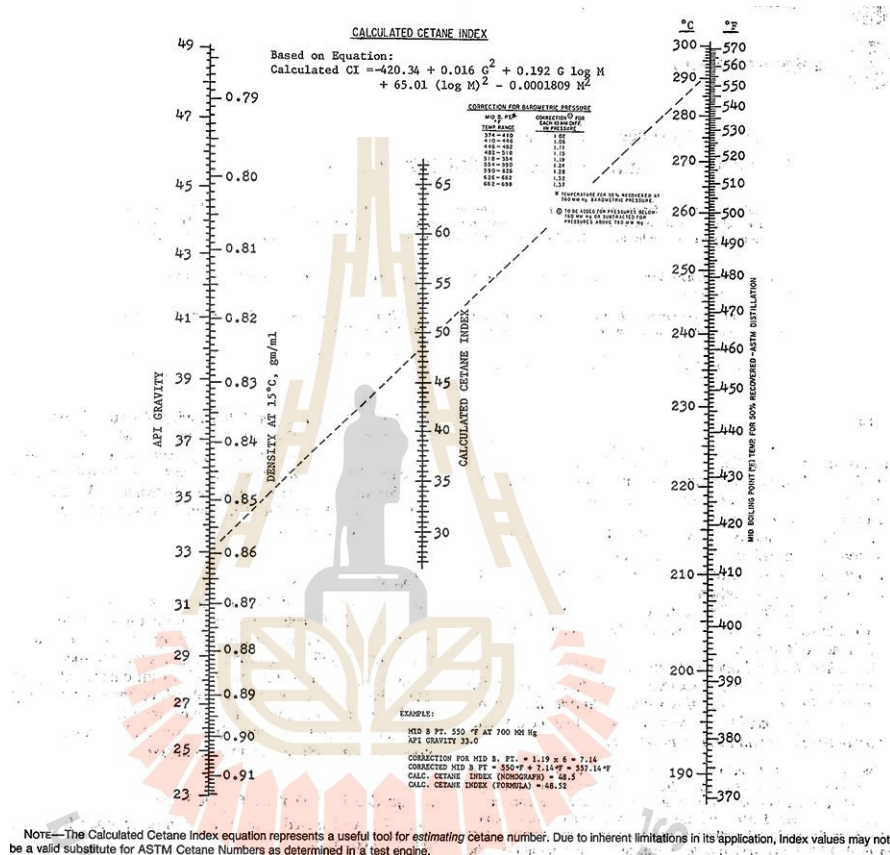
3.2.4 จุดวาบไฟ

การทดสอบจุดวาบไฟ (Flash Point) ตามมาตรฐาน ASTM D93 คือการวัดอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเชื้อเพลิงระเหยออกมาเป็นไอเพียงพอที่จะติดไฟเมื่อสัมผัสกับแหล่งจุดประกายไฟในภาชนะปิด เครื่องมือที่ใช้คือ Pensky–Martens Closed Cup Apparatus ซึ่งประกอบด้วยถ้วยใส่ตัวอย่างน้ำมัน เทอร์โมมิเตอร์ และแหล่งจุดไฟ เช่น แก๊สหุงต้ม โดยขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการให้ความร้อนแก่น้ำมันทดสอบอย่างช้า ๆ จนระวัดอุณหภูมิ เมื่อน้ำมันถึงอุณหภูมิที่กำหนด จะมีการจุดประกายไฟเพื่อหาจุดที่น้ำมันติดไฟ จุดวาบไฟนี้บ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อการติดไฟของน้ำมันในสถานการณ์การใช้งานต่าง ๆ โดยช่วงอุณหภูมิทดสอบอยู่ระหว่าง 40 ถึง 360 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยให้ประเมินความปลอดภัยในการจัดเก็บและใช้งานได้อย่างเหมาะสม

3.2.5 ดัชนีซีเทน

การทดสอบหาค่าดัชนีซีเทน (Calculated Cetane Index (CCI)) ตามมาตรฐาน ASTM D976 เป็นการคำนวณค่าซีเทนโดยไม่ต้องใช้เครื่องยนต์หรือการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

ดัชนีซีเทนบ่งบอกถึงความสามารถในการจุดระเบิดของน้ำมันดีเซล ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยการคำนวณ CCI ใช้ข้อมูลสองค่าหลัก ได้แก่ อุณหภูมิการกลั่นที่ 50% โดยปริมาตร (Mid Boiling Point) และความหนาแน่นหรือความถ่วงเอพิโอ (API Gravity) ที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ค่านี้ช่วยในการประเมินคุณภาพการจุดระเบิดของน้ำมันดีเซล ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจสอบคุณภาพเชื้อเพลิงเบื้องต้น ซึ่งค่าดัชนีซีเทนสามารถหาได้จากโนโมกราฟดัง รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โนโมกราฟ (Nomograph) สำหรับการหาค่าดัชนีซีเทน

3.2.6 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

การทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value) ตามมาตรฐาน ASTM D240 เป็นการวัดพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ IKA รุ่น C5000 PKG 1/12 วิธีการนี้จะวัดค่าความร้อนสูงสุดหรือค่าความร้อนมวลรวม (Higher Heating Value (HHV)) ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดรวมถึงค่าความร้อนแฝงที่เกิดจากการกลั่นตัวของน้ำ ค่าความร้อนที่วัดได้นี้เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินพลังงานที่น้ำมันเชื้อเพลิงสามารถผลิตได้ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

3.2.7 ความสามารถในการหล่อลื่น

การทดสอบความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิงดำเนินการตามมาตรฐาน CEC F-06-96 โดยใช้วิธี High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ประเมินการสึกหรอของชิ้นส่วนที่สัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิงในการใช้งานจริง วิธีการทดสอบนี้จะใช้ลูกบอลเหล็กเคลื่อนที่ไถไปมาในแนวระนาบบนแผ่นเหล็กที่จมอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิง การทดสอบนี้จะวัดขนาดของรอยสึกหรอบนลูกบอล เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการหล่อลื่นของน้ำมัน ค่าที่ได้จากการวัดรอยสึกหรอจะถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐาน โดยค่ารอยสึกหรอที่เล็กหมายถึงน้ำมันมีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดี ซึ่งช่วยลดการสึกหรอของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ เงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่นเป็นไปตาม ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดสอบคุณสมบัติการหล่อลื่น

ค่าตัวแปร	ค่ากำหนด	หน่วย
ปริมาตรของเหลว	2 ± 0.2	มิลลิลิตร
ความยาวช่วงชัก	1 ± 0.02	มิลลิเมตร
ความถี่	50 ± 1	เฮิร์ตซ์
อุณหภูมิของเหลว	60 ± 2	องศาเซลเซียส
น้ำหนักมวลทดสอบ	200 ± 1	กรัม
ระยะเวลาการทดสอบ	75 ± 0.1	นาทีก
พื้นผิวอ่าง	600 ± 100	ตารางมิลลิเมตร

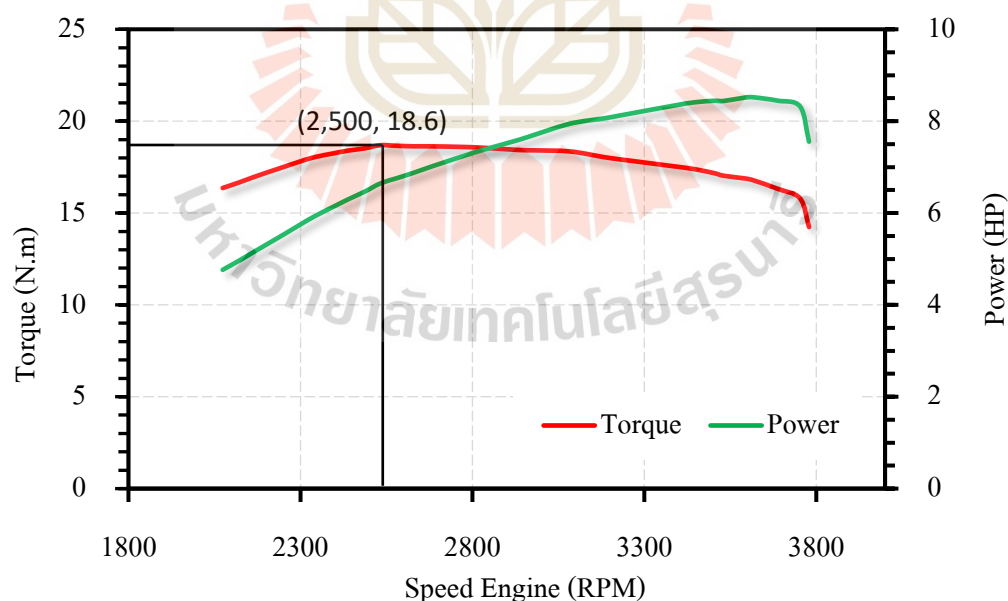
3.3 การติดตั้งและการทดสอบเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบถูกใช้ทดสอบสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และการปล่อยมลพิษจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันอ้างอิง โดยจะทดสอบเปรียบเทียบกับน้ำมัน BHD และ BHD ผสมกับไบโอดีเซลที่สัดส่วนต่าง ๆ ในการทดสอบเครื่องยนต์การปรับโหลดและความเร็วรอบจะต้องเป็นไปตามค่าที่กำหนด ข้อมูลสัญญาณของเซ็นเซอร์ทั้งสองจะถูกเก็บค่าและแสดงผลโดย Arduino UNO R3 กรองสัญญาณรบกวนโดยใช้ Low Pass Filter เพื่อควบคุมค่า Error ไม่ให้เกินช่วง $\pm 1\%$ สามารถปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์ได้โดยใช้ Switch Push Button ควบคุม DC Motor Gear ที่ถูกติดตั้งไว้ที่คันเร่ง การปรับโหลดสามารถทำได้ด้วยการปรับแรงดันและอัตราการไหลของน้ำซึ่งถูกควบคุมโดยการปรับวาล์วประตูน้ำ (Gate Valve) โดยใช้มือหมุน ค่าสัญญาณความเร็วรอบและโหลดถูกตรวจวัดโดยเซ็นเซอร์ Incremental Encoder และ Load Cell ซึ่งถูกติดตั้งที่บริเวณปลายเพลลาและแกนของไดนาโมมิเตอร์ตามลำดับ

คุณลักษณะการเผาไหม้ถูกตรวจวัดโดยใช้เซ็นเซอร์วัดแรงดันในกระบอกสูบ Kistler 6052C ถูกติดตั้งไว้ที่ฝาสูบซึ่งจะถูกวัดไปพร้อมกับเซ็นเซอร์วัดองศาเพลาคือ Kistler 2614C11 ความละเอียดการวัด 0.1 °CA ถูกติดตั้งที่ Flywheel โดยสัญญาณ Encoder ที่ได้มาจะถูกแปลงโดย Encoder Electronic 2614C21 ซึ่งสัญญาณเซ็นเซอร์แรงดันในกระบอกสูบและองศาเพลาคือ Kistler 2614C11 จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ Kibox 2893AK1 สัญญาณที่ถูกเก็บมาจะแสดงผลคุณลักษณะการเผาไหม้ผ่านโปรแกรม Kibox Cockpit โดยเก็บค่าสัญญาณการเผาไหม้จำนวน 100 cycle แล้วหาค่าเฉลี่ย

การปล่อยมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC) และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ถูกตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือวัดแก๊สไอเสีย Testo 350 การปล่อยควันดำถูกตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควันดำ (Opacity smoke-meter) Horiba MEXA-600S เครื่องมือทั้งสองจะถูกติดตั้งบริเวณที่ปลายท่อไอเสียและจะเริ่มทำการวัดก็ต่อเมื่อมีการปรับความเร็วรอบและโหลดเครื่องยนต์ให้ได้ตามค่าที่ต้องการ

การทดสอบนี้ ใช้เครื่องยนต์ดีเซลสูบตั้ง 1 ลูกสูบ 4 จังหวะ ความจุกระบอกสูบ 418 CC ระบายความร้อนด้วยอากาศ ระบบฉีดน้ำมันเป็น Direct Injection ดูดอากาศโดยธรรมชาติ (Naturally Aspirated Engine) กำลังเครื่องยนต์สูงสุด 8.6 HP ที่ความเร็วรอบ 3600 RPM สามารถสร้างแรงบิดสูงสุด 18.6 N-m ที่ความเร็วรอบ 2,500 RPM รายละเอียดแสดงดัง **รูปที่ 3.3**

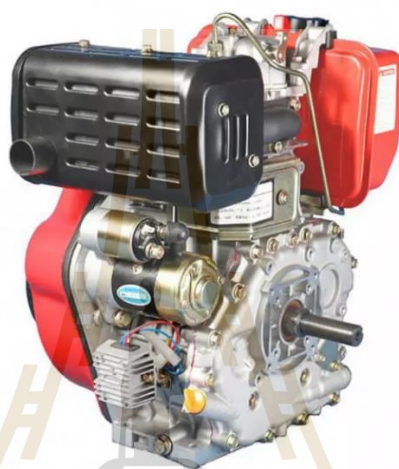


รูปที่ 3.3 แรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ Kawama 186F

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

3.3.1.1 เครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยอากาศระบบฉีดน้ำมันแบบ Direct Injection ขนาดความจุกระบอกสูบ 418 CC ระบบดูดอากาศโดยธรรมชาติ (Naturally Aspirated Engine) ข้อมูลจำเพาะเครื่องยนต์แสดงดัง ตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 เครื่องยนต์ดีเซลหนึ่งสูบที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซล Kawama 186F

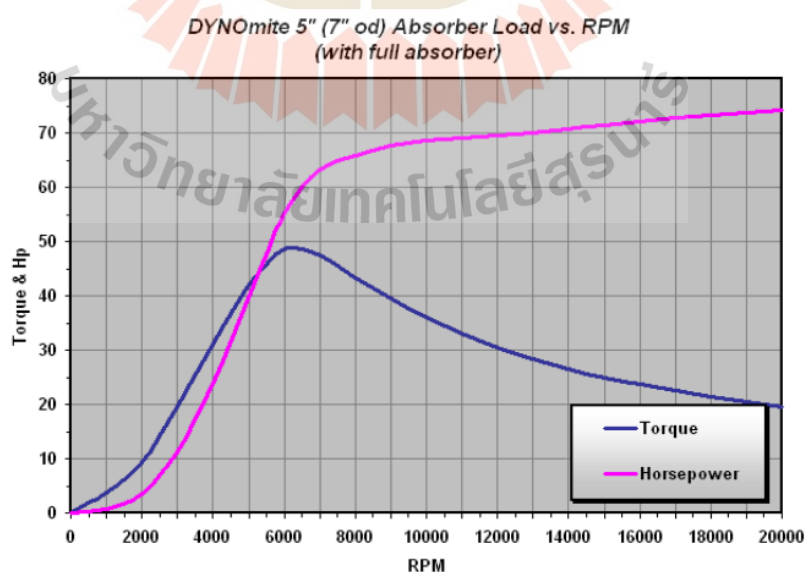
Engine	Specification
Engine Model	Kawama 186F
Engine type	Single Cylinder, 4-Stroke, Air Cooled
Bore x Stroke	86 x 72 mm
Rated. Power	8.6 HP@3600 RPM
Total Piston Displacement	418 cc
Compression Ratio	19.5:1
Capacity of Lubrication	1.65 L
Lubricant	SAE10 W30
Type of Fuel	Diesel

3.3.1.2 ไตนาโมมิเตอร์

ไตนาโมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองภาระของเครื่องยนต์อาศัยหลักการของการดูดกลืนพลังงานจากเครื่องยนต์ ไตนาโมมิเตอร์หากแบ่งตามการพิจารณาวิธีการดูดกลืนพลังงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1.ไตนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำในการเบรก (Hydraulic dynamometer) 2. ไตนาโมมิเตอร์แบบใช้กระแสเหนี่ยวนำในการเบรก (Eddy Current Dynamometer) ในงานวิจัยนี้ใช้ไตนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำในการเบรก แสดงได้ดัง รูปที่ 3.5 และ ข้อมูลของไตนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำเบรกแสดงดัง ตารางที่ 3.3 และ รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ไฮดรอลิกไตนาโมมิเตอร์ชนิดใช้น้ำในการเบรก



รูปที่ 3.6 สมรรถนะของไฮดรอลิกไตนาโมมิเตอร์

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลไดนามิเตอร์ชนิดใช้น้ำในการเบรก

Engine	Specification
Maker	Land and Sea Dynamometer
Model	Kart and Small Engine Dynamometers
Load Control	Manual-Knob Water-Brake Load Valve
Dimensions (W x L x H)	11" x 28" x 17" (Including Case)
Water-Direction Flow	Toroidal-Flow Vortex Pattern
Minimum Water Flow	1 gpm @30 to 60 psi
Vane Size	7"
Calibration Length	23 cm

3.3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสียที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 ใช้ในการวัดค่ามลพิษ CO NO_x และ HC โดยรายละเอียดของเครื่องมือวัดแสดงดัง รูปที่ 3.7 และ ตารางที่ 3.4 และเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควัน Horiba MEXA-600s โดยรายละเอียดเครื่องมือวัดและข้อมูลทางเทคนิคแสดงดัง รูปที่ 3.8 และ ตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.7 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350

Measurement Parameter	Measurement Rang	Accuracy	Resolution
O ₂	0-25 vol%	± 2 vol%	0.01 vol%
CO , H ₂ -comp.	0-10,000 ppm	± 10 ppm (0-199ppm) ± 5 ppm of reading 200-2,000ppm ± 10 ppm of reading (rest of range)	1 ppm
CO _{low} , H ₂ -comp.	0-500 ppm	± 2 ppm (0-39.9 ppm) ± 5 ppm of reading (rest of range)	0.1 ppm
NO	0-4000 ppm	± 5 ppm (0-99 ppm) ± 5 ppm of reading 100-1,999 ppm ± 10 ppm of reading (rest of range)	1 ppm
NO _{low}	0-300 ppm	± 2 ppm (0-39 ppm) ± 5 ppm of reading (rest of range)	
NO ₂	0-500 ppm	± 5 ppm (0-99 ppm) ± 5 ppm of reading (rest of range)	0.1 ppm
CO ₂ (IR)	0-50 vol%	± 0.3 vol% (0-39 vol%) ± 0.5 vol% of reading (rest of range)	0.01 vol%
HC	Natural gas: 100-40,000 ppm Propane: 100-21,000 ppm Butane: 100-18,000 ppm	± 400 ppm (100-4000 ppm) ± 5 % of reading (rest of range)	10 ppm



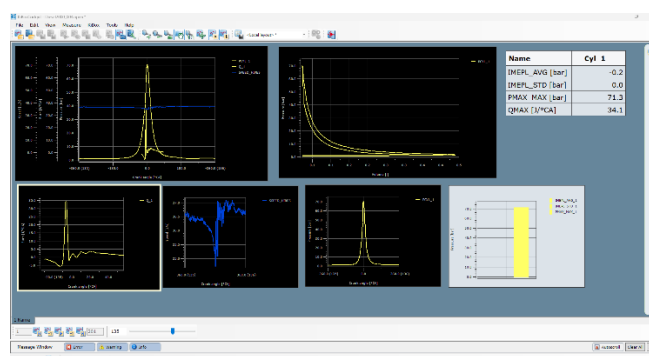
รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควันดำ Horiba MEXA-600S

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวัดดัชนีเขม่าควันดำ Horiba MEXA-600S

Technical Data	
Measuring Range	- Opacity: 0.0 to 99.9% - Light Absorption Coefficient: 0.000 to 9.999 m ⁻¹
Accuracy ± 1 Digit	Within ± 0.15 m ⁻¹ (for ND filter of 1.7 m ⁻¹ ± 0.05 m ⁻¹)
Repeatability	Within ±0.02 m ⁻¹ (Maximum Deviation from Mean Value of 4 Times Measurement, Using 1.7 m ⁻¹ ND filter)
Drift	Withing ±0.15 m ⁻¹ (For Zero Point)
Sampling Method	Use of Pressure Difference Between Engine Exhaust and Atmospheric Condition.
Environment	- Ambient Temperature: 5 to 40 °C - Sample Gas Temperature: 200 °C or Less (at Probe Inlet) 150 °C or Less (at Detector Unit inlet) - Humidity: 90% or Less (at Relative Humidity) - Ambient Pollution Level: 2% or Less (as Opacity)

3.3.1.4 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์

เครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือชุดเครื่องมือวัดความดันในกระบอกสูบ ซึ่งจะประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor) และเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) และชุดเครื่องมือวัดองค์ประกอบเชื้อเพลิง ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้จะใช้ในการคำนวณอัตราการปลดปล่อยความร้อนเพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ โดยรายละเอียดข้อมูลของเครื่องมือแสดงดัง รูปที่ 3.9 และ ตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.9 หน้าต่างโปรแกรมวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลจำเพาะเครื่องมือวิเคราะห์การเผาไหม้

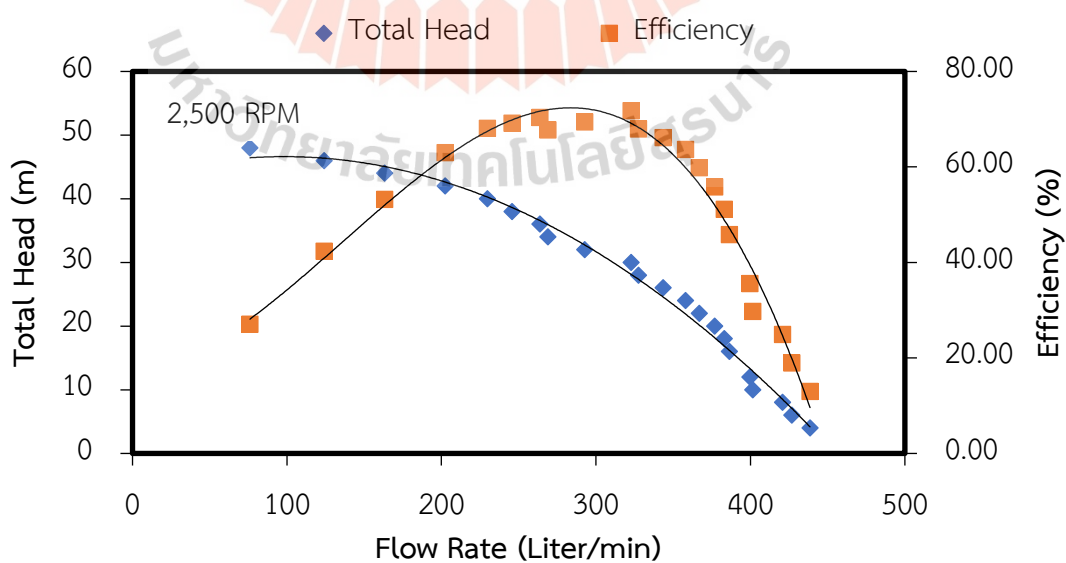
Pressure Sensor	
Maker	Kistler
Model	6052 C
Measuring Range	0-250 / 0-300 bar
Sensitivity	$\approx -20 / \approx -19$
Natural Frequency	≈ 160 kHz
Linearity	$\leq \pm 0.3 / \pm 0.5$
Temperature Range	-20 - 350 °C
Crank Angle Encoder	
Maker	Kistler
Model	Type 2614C11
Principle	Imaging Scanning (optical)
Crank Angle Encoder Disk	720 Angle Marks, 1 Trigger Mark
Speed Range	0-12,000 1/min
Temperature Range	-40 - 85 °C
Mechanical Interface/Mounting Diameter (Mounting Compatibility to Type 2614B1)	60 mm
Resolution	0.1°CA
Delay Time	<0.1 μ s
Encoder Electronics	
Maker	Kistler
Model	Type 2614C21
Principle	Adaptive Signal-Conditioner Switching
Connections	7 Pin Connection Socket for Crank Angle Encoder, 12 Pin Connection Socket (LVDS) to the Measurement System
Voltage Supply	5-30 VDC
Delay time	<0.1 μ s
Control & Indication LED's	Power, Rotation CW ¹ / CCW ² , Trigger, Synchronization
Output Signal to Indicating System	LVDS – Compatible, Short Circuit-Protected TTL – Compatible, Short Circuit-Protected
Operating Temperature	-30 - 70 °C

3.3.1.5 ข้อมูลปั้มน้ำ

ปั้มน้ำที่ใช้ในการทดสอบระยะยาวเป็นแบบปั้มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) รายละเอียดแสดงดัง ตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดปั้มน้ำแบบหอยโข่ง

Engine	Specification
Engine Model	Kawama 186F
Engine Type	4-Stroke, 1 Cylinder, Air Cooled, Direct Injection
Bore x Stroke	86 × 72 mm
Total Piston Displacement	418 cc
Compression Ratio	19.5:1
Rated Power	8.6HP@3600 rpm
In Water Pipe Diameter (inch)	3"
Out Water Pipe Diameter (inch)	3"
Volume Flow Rate (m ³ /h)	50
Max. Lift Head (m)	8
Max. Discharge Head (m)	70



รูปที่ 3.10 กราฟสมรรถนะปั้มน้ำของเครื่องยนต์ Kawama 186F

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลการทดสอบปั๊มของเครื่องยนต์ Kawama 186F ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องยนต์	Kawama 186F	
ความเร็วรอบ	2,500 rpm	
กำลังเครื่องยนต์	4869 W	
ข้อมูลเพิ่มเติม	ปั๊มขนาด 3 นิ้ว ความสูงใบพัดเท่ากับ 27 มม. จำนวน 4 ครีบ	
Head (m)	Flow rate (m ³ /h)	Efficiency (%)
4	26.31579	13.00
6	25.60455	18.97
8	25.24544	24.94
10	24.09639	29.75
12	23.98401	35.54
16	23.18094	45.79
18	22.98851	51.09
20	22.61307	55.84
3.00	22.01835	59.81
4.00	21.47971	63.65
5.00	20.60675	66.15
6.00	19.65066	67.93
8.00	19.36525	71.73
10.00	17.56955	69.42
12.00	16.13626	67.74
14.00	15.82418	70.34
16.00	14.74201	69.17
18.00	13.78254	68.07
20.00	12.14575	62.98
22.00	9.793254	53.20
24.00	7.44879	42.31
26.00	4.562738	27.04

3.3.1.6 มาตรวัดน้ำและเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล

การวัดอัตราการไหลของน้ำในขณะทดสอบใช้มาตรวัดแบบเทอร์ไบน์ซึ่งเป็นการวัดการไหลตามแนวแกน ใบกังหันจะถูกติดตั้งบนแกนเพลลาโดยแกนหมุนจะตั้งฉากกับเส้นทางการไหล ในขณะที่ของไหลหรือน้ำไหลผ่านจะส่งผลให้ใบกังหันหมุนด้วยความเร็วที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของไหล ซึ่งวิธีการวัดความเร็วของการหมุนของใบกังหันจะอาศัยเซ็นเซอร์แบบเหนี่ยวนำ (Inductive Proximity Sensors) โดยรูปที่ 3.11 แสดงมาตรวัดน้ำและเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล



รูปที่ 3.11 มาตรวัดน้ำและเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล

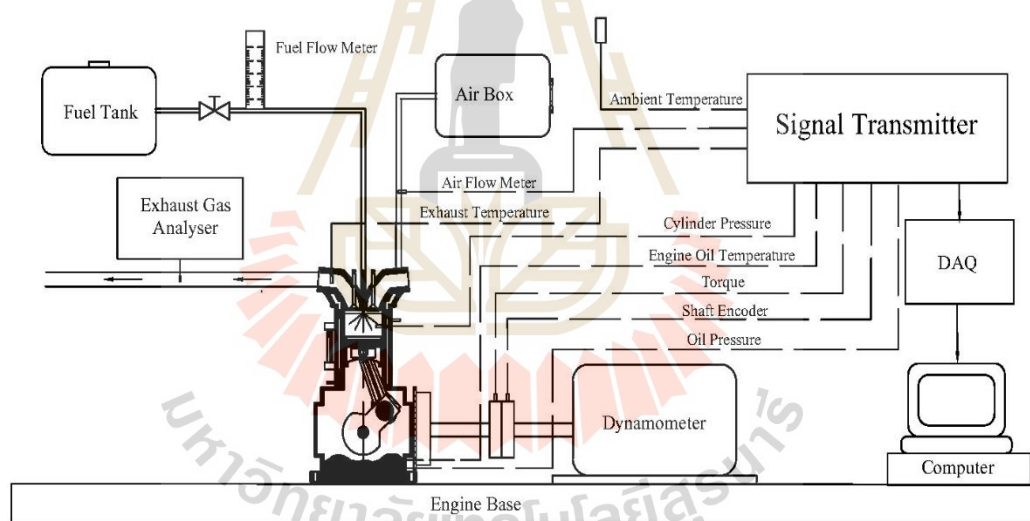
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์

การทดสอบเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนได้แก่ ในส่วนแรกเป็นการทดสอบเครื่องยนต์ระยะสั้น เพื่อประเมินสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสียจากเครื่องยนต์ ในส่วนที่สองเป็นการทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาว เพื่อประเมินการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนทดสอบและหลังทดสอบ ก่อนเริ่มการเก็บค่าสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษ ให้ทำการหาค่า Performance Curve ของเครื่องยนต์แสดงดัง รูปที่ 3.3 เพื่อเป็นตัวกำหนด Load และความเร็วรอบที่ต้องการทดสอบโดยจะยึดค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดเป็นเกณฑ์การทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์สามารถทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. เริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์โดยให้ทำงานที่รอบเดินเบาระยะเวลา 10 นาที หรือสังเกตจากอุณหภูมิน้ำมันเครื่องให้อยู่ที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส

2. เปิดคันเร่งให้สุด เครื่องยนต์จะเร่งสู่ความเร็วสูงสุด จากนั้นให้เริ่มทำการจ่าย โหลดโดยการเปิดวาล์วน้ำเพื่อปรับอัตราการไหลและแรงดัน น้ำจะจ่ายเข้าสู่ไดนาโมมิเตอร์
3. เริ่มบันทึกค่าข้อมูลแรงบิดและความเร็วรอบเครื่องยนต์โดยใช้ Arduino Uno R3 โดยข้อมูลจะถูกเก็บค่าทุก ๆ 0.1 วินาที
4. เพิ่มโหลดให้กับเครื่องยนต์โดยให้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ลดลงช้า ๆ ให้ ลดลงครึ่งละ 200 RPM ทำการเพิ่มโหลดไปเรื่อย ๆ จนเครื่องยนต์ดับ
5. หยุดบันทึกข้อมูล
6. ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งโดยเริ่มตั้งแต่ข้อที่ 2 ถึงข้อที่ 5

เมื่อทดสอบเสร็จจะได้กราฟแรงบิดและกำลังแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยจะทำซ้ำในทุก ๆ น้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อหาแรงบิดและกำลังในแต่ละน้ำมัน แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเครื่องยนต์แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในเครื่องยนต์

3.3.2.1 การติดตั้งเครื่องยนต์เพื่อทดสอบระยะสั้น

การติดตั้งเครื่องยนต์เพื่อทดสอบระยะสั้นมีจุดประสงค์คือ ประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ และการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ น้ำมัน BHD และ น้ำมัน BHD ผสมกับไบโอดีเซลโดยมีน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันอ้างอิง เครื่องยนต์ให้แรงบิดสูงสุดเท่ากับ 18.6 N-m แสดงดัง รูปที่ 3.3 ที่ความเร็วรอบ 2,500 RPM ดังนั้นเงื่อนไขการทดสอบจะอ้างอิงจากความเร็วรอบที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดเป็นหลัก ในการทดสอบนี้ทำการทดสอบที่

ความเร็วรอบ 2,000, 2,500, และ 3,000 RPM ในแต่ละความเร็วรอบทำการทดสอบที่โหลด 25%, 50%, 75%, และ 90% ของโหลดสูงสุดโหลดของเครื่องยนต์ถูกปรับโดยใช้ Hydraulic Dynamometer อัตราการไหลของน้ำมันถูกวัดโดยใช้บิวเรท มลพิษ CO, NO_x และ HC ถูกวัดโดยเครื่อง Testo 350 และ Smoke ถูกวัดโดย Horiba MEXA-600s โดยค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันและการปล่อยมลพิษจะถูกทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งจากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ย โดยขั้นตอนการเก็บค่าสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. เริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์โดยให้ทำงานที่รอบเดินเบาระยะเวลา 10 นาที หรือสังเกตจากอุณหภูมิน้ำมันเครื่องให้อยู่ที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส
2. ปรับโหลดให้กับเครื่องยนต์ที่ 25% ของโหลดสูงสุดหรือมีค่าเท่ากับ 4.5 N-m และคงความเร็วรอบเครื่องยนต์ให้อยู่ที่ 3,000 RPM โดยการปรับค่าโหลดและความเร็วรอบยอมรับค่าความผิดพลาดได้ $\pm 1\%$
3. ทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์สมรรถนะเครื่องยนต์ได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบและจับเวลาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง บันทึกตัวแปรคุณลักษณะการเผาไหม้ ได้แก่ ความดันในกระบอกสูบและองศาเพลวข้อเหวี่ยง บันทึกค่ามลพิษด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ไอเสีย ได้แก่ NO_x, CO, HC และ Smoke
4. ทำการทดสอบซ้ำจากข้อที่ (1) ถึงข้อที่ (3) คงความเร็วรอบที่ 3,000 RPM และเปลี่ยนแปลงโหลดเป็น 50%, 75% และ 90% ของโหลดสูงสุดตามลำดับ
5. เมื่อทดสอบที่ความเร็วรอบ 3,000 RPM เสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 2,500 RPM และ 2,000 RPM จากนั้นให้ทำการทดสอบซ้ำตามขั้นตอนข้อที่ (1) ถึงข้อที่ (4)

3.3.2.2 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องยนต์เพื่อทดสอบระยะยาว

การทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาวจะทำการทดสอบเพื่อประเมินการสึกหรอ ก่อนทดสอบและหลังทดสอบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล BHD และ BHD ผสม Biodiesel ที่สัดส่วน 10% โดยรูปที่ 3.13 แสดงการวัดชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 200 ชั่วโมง รายละเอียดและขั้นตอนการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

1. ทำการ Overhauls เครื่องยนต์โดยทำการเปลี่ยนชิ้นส่วนดังรายการต่อไปนี้

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1.1. Air filter | 1.8. Intake Valve |
| 1.2. Connecting Rod Bearing | 1.9. Exhaust Valve |
| 1.3. Gasket Set | 1.10. Connecting Rod |
| 1.4. Piston | 1.11. Tappet |
| 1.5. Piston Ring | 1.12. Injection Nozzle |

1.6. Cylinder Liners

1.13. Injection Pump

1.7. Diesel Fuel Filter

2. ล้างทำความสะอาดชิ้นส่วนเครื่องยนต์

3. ทำการตรวจวัดขนาดและชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์ในระหว่างวัดขนาดมีการคุมอุณหภูมิห้องที่ 20 °C ชิ้นส่วนที่ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักแสดงดังต่อไปนี้

3.1. Cylinder Liner

3.5. Crankshaft

3.9. Exhaust Valve

3.2. Tappet

3.6. Piston Ring

3.10. Intake Valve

3.3. Connecting Rod Bearing

3.7. Piston Pin

3.4. Piston Pin Bushing

3.8. Piston



รูปที่ 3.13 การตรวจวัดขนาดและชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์

4. ประกอบเครื่องยนต์ให้พร้อมใช้งานและติดตั้งเครื่องยนต์เข้ากับไดนาโมมิเตอร์บนแท่นทดสอบ

5. ทำการ Run-In เครื่องยนต์เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมงโดยเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะไร้โหลด โดยที่ไม่ได้ต่อเครื่องยนต์เข้ากับไดนาโมมิเตอร์และกำหนดความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 1,500 RPM

6. เมื่อรันเครื่องยนต์ครบระยะเวลา 20 ชั่วโมงทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่องปริมาณ 100 ml ในบริเวณก่อนเข้ากรองน้ำมันเครื่อง

7. ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เพื่อหาแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ ติดตั้งเพลาส่งกำลังระหว่างไดนาโมมิเตอร์กับเครื่องยนต์ จากนั้นทำการทดสอบดังต่อไปนี้

7.1. สตาร์ทเครื่องยนต์ทิ้งไว้ 10 นาทีหรือให้อุณหภูมิเครื่องยนต์เท่ากับ 70-80 °C

7.2. เปิดคันเร่งให้สุดความเร็วรอบเครื่องยนต์จะอยู่ที่ 4,000 RPM

7.3. ทำการจ่ายโหลดให้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ค่อย ๆ ลดลงทีละ 200 RPM

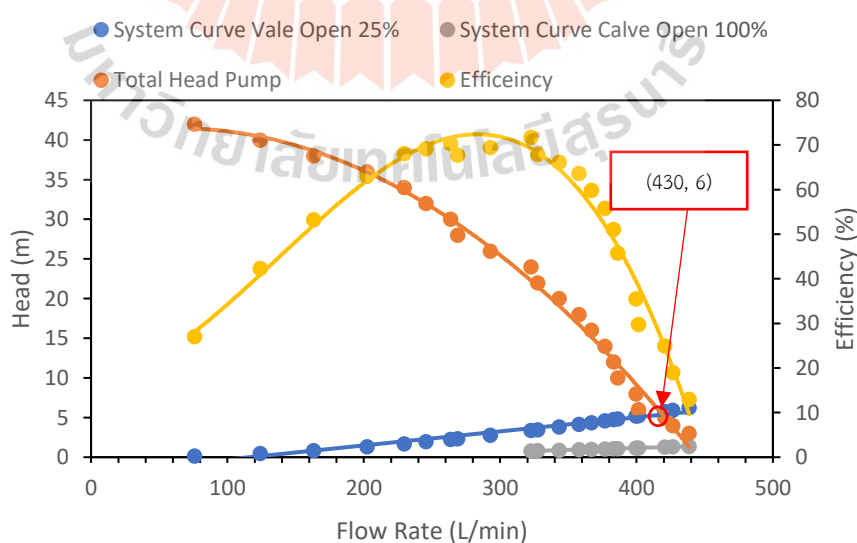
จากนั้น ในระหว่างที่จ่ายโหลดจะมีการเก็บข้อมูลทุก ๆ 0.1 วินาทีโดยใช้ Arduino UNO R3 เก็บบันทึกค่า RPM และ Torque

7.4. จ่ายโหลดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าเครื่องยนต์ดับ

7.5. ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

8. เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง

9. เริ่มทำการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง จาก รูปที่ 3.14 จุดทำงานของปั๊มคือจุดตัดกันระหว่าง Head ของปั๊มกับ Head ของระบบ ซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากับ 430 ลิตร/นาที และ แรงดันขาออกเท่ากับ 6 psi ซึ่งมีประสิทธิภาพปั๊มเท่ากับ 18.97% แต่เนื่องจากเราต้องการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ การที่จ่ายโหลดน้อยอาจส่งผลต่อการสึกหรอที่น้อยตาม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเพิ่มโหลดเป็นอัตราการไหล 367 ลิตร/นาที ที่แรงดันขาออกเท่ากับ 22 psi จะทำให้ประสิทธิภาพปั๊มเป็น 59.81%



รูปที่ 3.14 จุดทำงานระหว่างปั๊มน้ำและระบบ

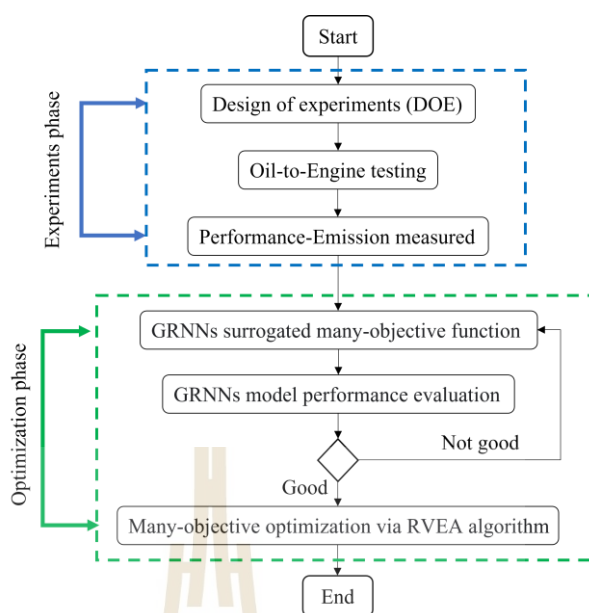
10. เมื่อทดสอบครบทุก ๆ 100 ชั่วโมง ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่องปริมาณ 100 ml ต่อการเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างอยู่ที่จุดเติมน้ำมันเครื่อง
11. เมื่อทดสอบครบระยะเวลา 200 ชั่วโมงให้เริ่มทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์
12. ยกเครื่องลงจากแท่นทดสอบเพื่อเตรียมถ่ายรูป วัดขนาดและชั่งน้ำหนักชิ้นส่วน
13. แยกชิ้นส่วนเครื่องยนต์ให้เรียบร้อย ทำการถ่ายรูปเพื่อตรวจสอบคราบเขม่าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์
14. ล้างชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่จะวัดขนาดและชั่งน้ำหนักให้สะอาด
15. ตรวจวัดขนาดชิ้นส่วนและชั่งน้ำหนักบันทึกผล
16. ส่งตัวอย่างน้ำมันเครื่องชั่วโมงที่ 20, 100 และ 200 ชั่วโมงเพื่อตรวจหาปริมาณอนุภาคโลหะ

3.4 การหาแบบจำลองด้วยปัญญาประดิษฐ์และการหาค่าที่เหมาะสม

3.4.1 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรอินพุต

ในงานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของการผสมน้ำมัน BHD กับน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วนที่แตกต่างกัน นำเชื้อเพลิงมาทดสอบกับเครื่องยนต์ที่โหลดและความเร็วรอบที่แตกต่างกันเพื่อประเมินสมรรถนะและการปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้น การหาอัตราส่วนผสมของน้ำมันที่เหมาะสมในการใช้กับเครื่องยนต์ จึงมีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด โดยขั้นตอนงานวิจัยจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ได้แก่ 1. การทดสอบน้ำมันเชื้อเพลิงที่สภาวะโหลดและเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนไปเพื่อประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจริง (Experiment Phase) 2. การหาค่าตัวแปรอินพุตที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เอาต์พุตที่ดีที่สุด (Optimization Phase) แสดงดังรูปที่ 3.15

ซึ่งในขั้นตอนที่ 1 นั้นได้กล่าวในการทดสอบเครื่องยนต์ระยะสั้นไปแล้ว ก่อนจะเริ่มทำการหาค่าที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 2 ต้องมีการตรวจสอบดูผลกระทบระหว่างตัวแปรอินพุตต่อตัวแปรเอาต์พุตว่ามีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญสำคัญ (P-Value) เท่ากับ 0.05



รูปที่ 3.15 แผนภาพการทำงานระหว่างการทดลองและการหาค่าที่เหมาะสม

3.4.2 การใช้ GRNNs หาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

สมการที่จำลองและทำนายพฤติกรรมระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตเรียกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ งานวิจัยนี้สร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่จำลองพฤติกรรมของตัวแปรอินพุตที่มีผลกระทบต่อตัวแปรเอาต์พุต ข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ในแบบจำลองมีข้อมูล 180 จุดที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ ในกระบวนการสร้างแบบจำลองจุดข้อมูลเหล่านั้นถูกแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ 1. ชุดข้อมูลการเรียนรู้ (Training Data Sets) 2. ชุดข้อมูลการตรวจสอบ (Validate Data Sets) และ 3. ชุดข้อมูลการทดสอบ (Test Data Sets) ในอัตราส่วนของจุดข้อมูลทั้งหมดเท่ากับ 70: 10: 20 ด้วยวิธีการ Hold-Out Cross-Validation โดยการตรวจสอบข้อมูล แยกข้อมูล การสร้างแบบจำลอง GRNNs และการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ ดำเนินการเขียนอัลกอริทึมโดยใช้ภาษา Python การเรียนรู้ของแบบจำลอง GRNNs เริ่มต้นจากการนำข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองจนกระทั่งได้ผลลัพธ์การทำนาย สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.4.3 การหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

การหาค่าที่เหมาะสมจะเริ่มหลังจากประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง GRNNs แล้วว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ จากงานวิจัยหลายชิ้นที่นำเสนออัลกอริทึมการหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ [Liu et al, 2023], [Zhan et al, 2022] อัลกอริทึมวิวัฒนาการชั้นนำเวกเตอร์อ้างอิง (RVEA) ซึ่งเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายวัตถุประสงค์ได้รับเลือก RVEA ถูกเสนอโดย Cheng, Ran และคณะ [Cheng et al, 2016] โดยการ

ปรับเปลี่ยนตามอัลกอริทึมวิวัฒนาการดั้งเดิม (EAs) ด้วยการเพิ่มการกระจายของเวกเตอร์อ้างอิง การดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ของ RVEA สามารถสรุปได้ในขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ (ส่วนนี้กล่าวถึงการใช้งานอัลกอริทึมเป็นหลัก สำหรับทฤษฎีเพิ่มเติม สามารถดูในหัวข้อบททวนวรรณกรรม) [Cheng et al, 2016], [Jin et al, 2018]

ขั้นตอนที่ 1: โดยทั่วไปเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสมจะต้องทราบว่าการค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของปัญหา ในการนำ RVEA ไปใช้งานหาค่าที่เหมาะสมแสดงไว้ดัง **สมการ 3.1** โดยส่วนใหญ่แล้วเป้าหมายการหาที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือการหาที่น้อยที่สุด (Minimized) ยกเว้นค่า BTE ที่ต้องการค่าที่มากที่สุด (Maximized) นอกจากนี้ขอบเขตการค้นหา (Boundary) ได้แสดงใน **สมการ 3.2** ถูกตั้งค่าตาม Input Level (หมายเหตุ: แม้ว่าในความเป็นจริงแล้ว ปัจจัย Input (BHD (%) และ Load (%)) จะมีลักษณะเป็นข้อมูลที่ต่อเนื่องกัน (Continuous Data) แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการใช้งานจริง ข้อมูลจะถูกตั้งค่าให้เป็นข้อมูลแบบจำนวนเต็ม (Discrete Data) เพื่อให้่ายต่อการนำไปใช้งานและวิเคราะห์ข้อมูล

Type	Objective	Output	Many-Objective Function
Performance	Minimum	BSFC	$= F_{GRNNs}(BHD, RPM, Load) \quad (3.1)$
Performance	Maximum	BTE	
Emission	Minimum	HC	
Emission	Minimum	CO	
Emission	Minimum	NOx	
Emission	Minimum	Smoke	
Input		Data type	Boundary
BHD (%)		Discrete	$0 \leq BHD \leq 100$
RPM		Discrete	$2000 \leq RPM \leq 3000$
Load (%)		Discrete	$25 \leq Load \leq 90$

ขั้นตอนที่ 2: หลังจากที่กำหนดเป้าหมายการหาค่าที่เหมาะสมและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแล้ว พารามิเตอร์เริ่มต้นของการหาค่าที่เหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ของ RVEA จะถูกตั้งค่าตามคุณลักษณะของ RVEA ที่ได้รับการแก้ไขตามอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการ จะต้องกำหนดทิศทางการอ้างอิงสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการศึกษาครั้งนี้จากงานวิจัยหลายชิ้นทิศทางการอ้างอิงที่มีโครงสร้างของ Das และ Dennis ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างจุดอ้างอิงที่มีระยะห่างกัน โดยกำหนดจำนวนวัตถุประสงค์ในโครงสร้างอ้างอิงเป็น 6 และจำนวนช่องว่างระหว่างสองจุดติดต่อกันเป็น 6 ในขณะที่ประชากรเริ่มแรกถูกกำหนดไว้เท่ากับจำนวนจุดอ้างอิง (462 คะแนน) และจำนวนรุ่นถูกกำหนดไว้ที่

ขั้นตอนที่ 3: เริ่มต้นการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์แล้วกำหนดกลุ่มประชากรเริ่มต้นเป็นแบบสุ่ม โดยตัวแปรอินพุตถูกป้อนไปยังแบบจำลอง GRNNs เพื่อหาคำตอบการทำนาย และเลือกตัวแปรอินพุตที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ตามเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพ

ขั้นตอนที่ 4: จากผลการทำนายในขั้นตอนที่ 3 ทำการเลือกกลุ่มประชากรหลักใหม่เป็นประชากรรุ่นลูกหลานที่ถูกสร้างใหม่โดยใช้วิธีการครอสโอเวอร์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation)

ขั้นตอนที่ 5: หลังจากสร้างประชากรใหม่แล้วประชากรเหล่านั้นจะถูกนำเข้าสู่แบบจำลอง GRNNs ในขั้นตอนที่ 3 และนำไปไว้ในขั้นตอนที่ 4 โดยทำซ้ำขั้นตอนนี้นั้นกว่าจะถึงรุ่นสุดท้ายที่กำหนด



บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์ และการปรับปรุงค่าคุณสมบัติเชื้อเพลิงโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซล

น้ำมัน BHD มีข้อเสียคือค่าความหนาแน่นและคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ต่ำกว่าเกณฑ์คุณภาพของน้ำมันดีเซลที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดการนำมาใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ได้ ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติน้ำมัน BHD ด้วย Biodiesel ที่มีความหนาแน่นที่สูงและคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ดีจึงเป็นที่น่าสนใจและศึกษาในงานวิจัยนี้

4.1 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์

เบื้องต้นได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง ประกอบด้วย น้ำมันดีเซลมาตรฐาน น้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ (Bio-Hydrogenated Diesel (BHD)) และน้ำมันไบโอดีเซล (Fatty Acid Methyl Ester (FAME)) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าน้ำมัน BHD มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงและค่าดัชนีซีเทนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงจะทำให้การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อนที่สูงและสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกลในปริมาณที่สูง ส่วนค่าดัชนีซีเทนที่สูงจะทำให้ระยะเวลาในการผสมกันระหว่างอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงจนถึงจุดที่สามารถจุดติดไฟได้เองมีค่าน้อยลงส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เนื่องจากมีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่มากขึ้นในแต่ละวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ น้ำมัน BHD มีค่าความหนืดที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งจะส่งผลดีต่อการฉีดน้ำมันให้เป็นละอองฝอยได้มากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของละอองน้ำมันให้สามารถระเหยและผสมกับอากาศได้ดี ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นของน้ำมัน BHD มีค่าน้อยกว่าของน้ำมันดีเซล ค่าความหนาแน่นที่น้อยกว่าจะส่งผลให้น้ำมันที่ถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้มีมวลที่น้อยกว่าในปริมาตรการฉีดที่เท่ากันส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง จุดวาบไฟของน้ำมัน BHD มีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งจะส่งผลต่อการติดไฟได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำมันดีเซล ค่าจุดวาบไฟที่สูงจะเป็นประโยชน์ในเรื่องของปลอดภัยในการกักเก็บน้ำมัน BHD เมื่อบรรจุในถังน้ำมันของยานพาหนะ ในขณะที่อุณหภูมิการกลั่นของน้ำมัน BHD มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล แสดงถึงการระเหยของน้ำมัน BHD สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ส่งผลดีต่อกระบวนการผสมกันระหว่างน้ำมันกับอากาศ ค่าคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน BHD มีค่าด้อยกว่าน้ำมันดีเซล แสดงถึงการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์

โดยเฉพาะขึ้นส่วนในระบบการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต้องอาศัยคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเชื้อเพลิง ในการหล่อลื่นขึ้นส่วนต่างๆ จะมีการสึกหรอในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลต่ออายุการใช้งานที่ลดลงของ ขึ้นส่วนเหล่านั้น ซึ่งค่าคุณสมบัติของน้ำมัน BHD ที่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซลตาม ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงานประกอบด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าคุณสมบัติการหล่อลื่น

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

Fuel Properties	Test Method	Limit*	Diesel	BHD	FAME
Kinematic Viscosity at 40 °C (cSt)	ASTM D445	1.8-4.1	3.12	2.58	5.16
Specific Gravity at 15 °C	ASTM D1298	0.81-0.87	0.830	0.770	0.875
API Gravity at 15 °C	ASTM D1298	-	39	52	30
Density at 15 °C (kg/m ³)	ASTM D1298	-	829	769	874
Cetane Index	ASTM D976	>50	56	78	48
Gross Calorific Value (MJ/kg)	ASTM D240	-	43.48	47.02	39.62
Flash Point (°C)	ASTM D93	>52	78	87	169
Wear Scar Diameter (µm)	ISO 12156-1	<460	220	570	180
Distillation Temperature	ASTM D86				
Initial Boiling Point (°C)			182	158	302
10% Recovered (°C)			222	220	336
50% Recovered (°C)			280	258	356
90% Recovered (°C)		<357	334	274	374
Final Boiling Point (°C)			336	282	376

* Specified in the nation regulation of Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand

4.2 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพสังเคราะห์ผสมไบโอดีเซล

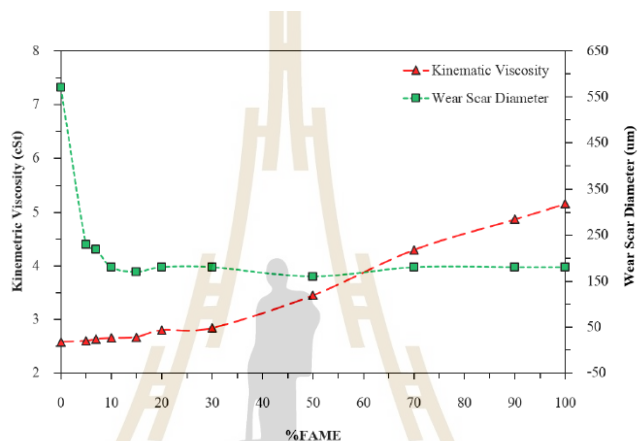
เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของน้ำมัน BHD ในเบื้องต้นและได้ข้อสรุปว่าน้ำมัน BHD มีค่าความ ถ่วงจำเพาะและคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซล จึงมีแนวคิดที่จะ ปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมัน BHD ด้วยการใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมกับน้ำมัน BHD ที่สัดส่วนต่างๆ

การเลือกใช้น้ำมันไบโอดีเซลเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมัน BHD มาจากเหตุผลที่น้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงและคุณสมบัติการหล่อลื่นชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ดี นอกจากนี้ น้ำมันไบโอดีเซลยังมีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันส่งผลดีต่อการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และเป็นการนำน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถผลิตได้เองในประเทศมาใช้เพื่อลดการใช้น้ำมันดีเซลนำไปสู่การลดการนำเข้าของน้ำมันดีเซล ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมัน BHD เมื่อมีการผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2 จากผลวิเคราะห์สามารถสรุปเป็นประเด็นสำคัญเมื่อเพิ่มสัดส่วนน้ำมันไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล

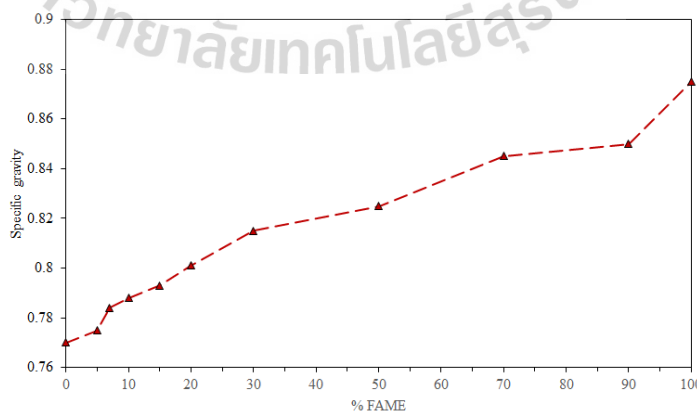
Fuel Properties	0%	5%	7%	10%	15%	20%	30%	50%	70%	90%	100%
	FAME	FAME	FAME	FAME	FAME	FAME	FAME	FAME	FAME	FAME	FAME
Kinematic											
Viscosity at 40 °C (cSt)	2.58	2.60	2.63	2.65	2.67	2.80	2.84	3.45	4.30	4.87	5.16
SG at 15 °C	0.770	0.775	0.784	0.788	0.793	0.801	0.815	0.825	0.845	0.850	0.875
API Gravity at 15 °C	52	51	49	48	47	45	42	40	36	35	30
Density at 15 °C (kg/m ³)	769	774	783	787	792	800	814	824	844	849	874
Cetane Index	78	76	72	70	68	65	60	59	55	55	48
HHV (MJ/kg)	47.02	46.56	46.57	46.26	45.74	45.21	44.54	43.10	41.64	40.28	39.62
Flash Point (°C)	87	91	89	86	82	86	90	99	120	138	169
WSD (µm)	570	230	220	180	170	180	180	160	180	180	180
Distillation Temperature											
Initial Boiling Point (°C)	158	160	160	162	166	170	174	182	198	258	302
10% Recovered (°C)	220	222	222	226	230	230	232	238	260	302	336
50% Recovered (°C)	258	260	262	262	264	266	270	286	308	324	356
90% Recovered (°C)	274	280	284	288	296	306	314	322	336	340	374
Final Boiling Point (°C)	282	288	290	300	306	308	318	324	338	342	376

ค่าความหนืดของน้ำมันผสมมีค่าสูงขึ้น และมีค่าเกินค่าความหนืดตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซลเมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วน 70% โดยปริมาตร ค่าคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันผสมมีค่าดีขึ้น โดยการพิจารณาจาก (Wear Scar Diameter (WSD)) ที่มีค่าเฉลี่ย และพบว่าการผสมน้ำมันไบโอดีเซลเพียง 5% โดยปริมาตรสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการหล่อลื่นได้เป็นอย่างดี การผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ 10% โดยปริมาตร ดูเหมือนจะเป็นค่าที่ทำให้ขนาดของ MWSD เริ่มมีค่าคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำมันไบโอดีเซลในสัดส่วนที่สูงกว่า 10% โดยปริมาตรอาจจะไม่สามารถช่วยในเรื่องของการเพิ่มคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน BHD ได้โดยแสดงดังรูปที่ 4.1



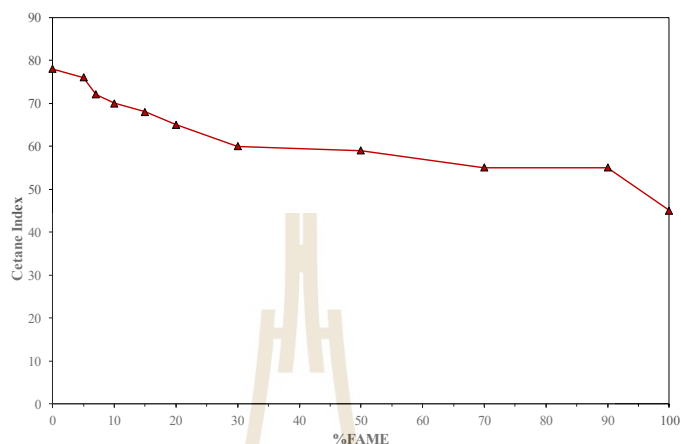
รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดและคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล

ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันผสมมีค่าสูงขึ้น และยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซลแม้ว่าจะผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วน 90% โดยปริมาตรแสดงดัง รูปที่ 4.2

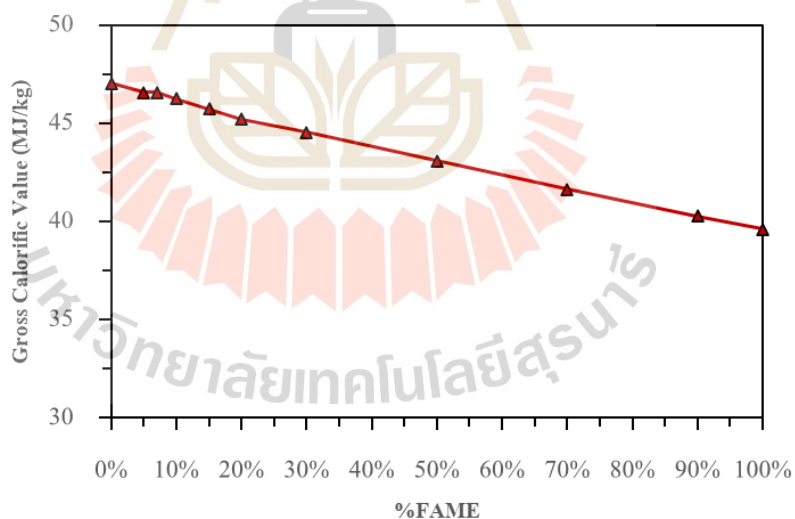


รูปที่ 4.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล

ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมันผสมมีค่าลดลง และยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซลแม้ว่าจะผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วน 90% โดยปริมาตรแสดงดัง **รูปที่ 4.3** ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันผสมมีค่าลดลงแสดงดังแสดงดัง **รูปที่ 4.4**

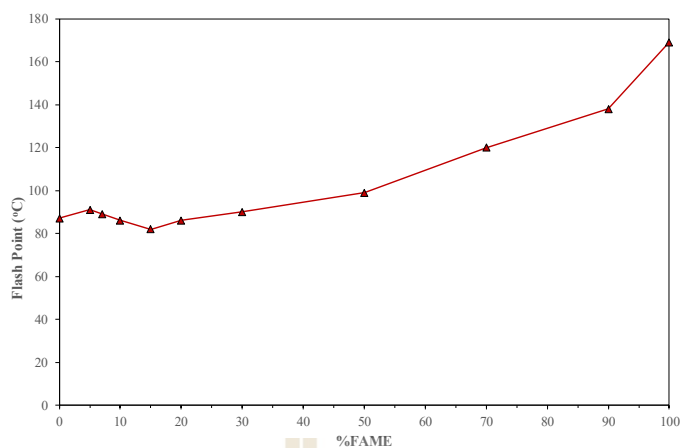


รูปที่ 4.3 ค่าดัชนีซีเทนของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล



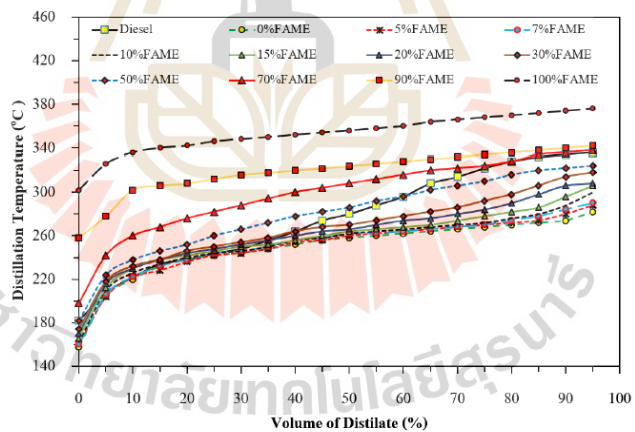
รูปที่ 4.4 ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล

ค่าจุลควาไฟของน้ำมันผสมมีค่าสูงขึ้น และยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซลที่ทุกสัดส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมในน้ำมัน BHD แสดงดัง **รูปที่ 4.5**



รูปที่ 4.5 ค่าจุดวาบไฟของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล

ค่าอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันผสมมีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิการกลั่นที่ 90 % Recovered พบว่าค่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานของน้ำมันดีเซลแม้ว่าจะผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วน 90% โดยปริมาตร (รูปที่ 6)



รูปที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมัน BHD ผสมน้ำมันไบโอดีเซล

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์สมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบน้ำมัน BHD และ น้ำมัน BHD ผสมกับไบโอดีเซลในสัดส่วน 10%, 20%, และ 30% เพื่อดูสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้และผลมลพิษไอเสียที่เกิดขึ้นจากการผสมน้ำมันไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ใช้เป็นน้ำมันอ้างอิง ผลการทดสอบแสดงดังนี้

5.1 การทดสอบเครื่องยนต์ระยะสั้น

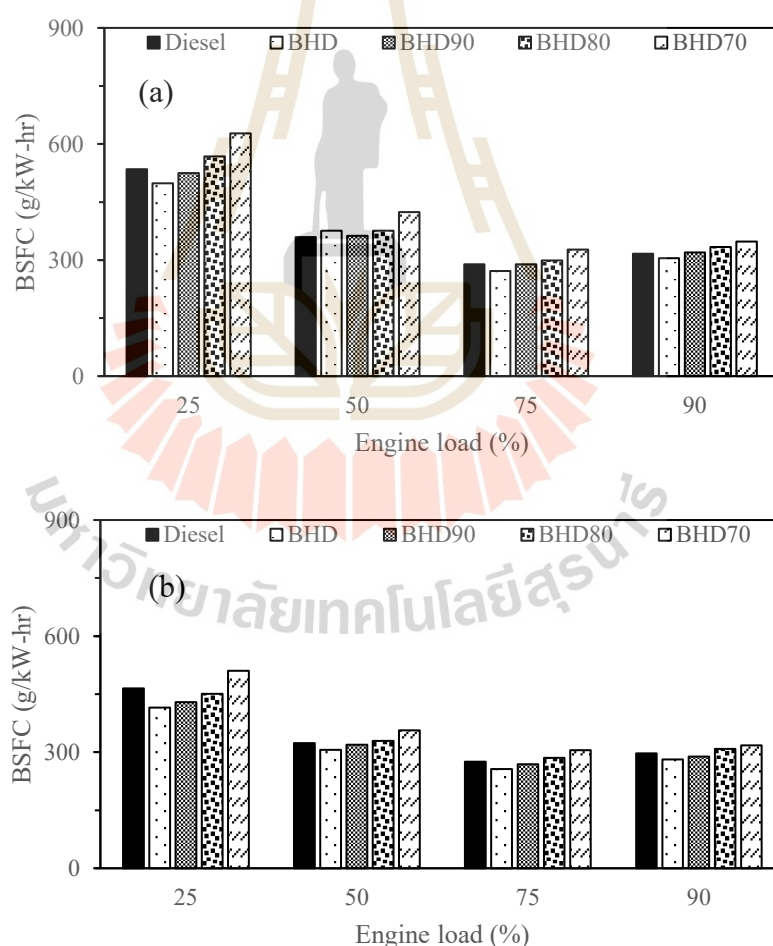
การทดสอบเครื่องยนต์ระยะสั้น เป็นการทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ ได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Brake Thermal Efficiency (BTE)) อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะเบรก (Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)) คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษไอเสียในเครื่องยนต์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC), ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) และเขม่ามันดำ (Smoke)

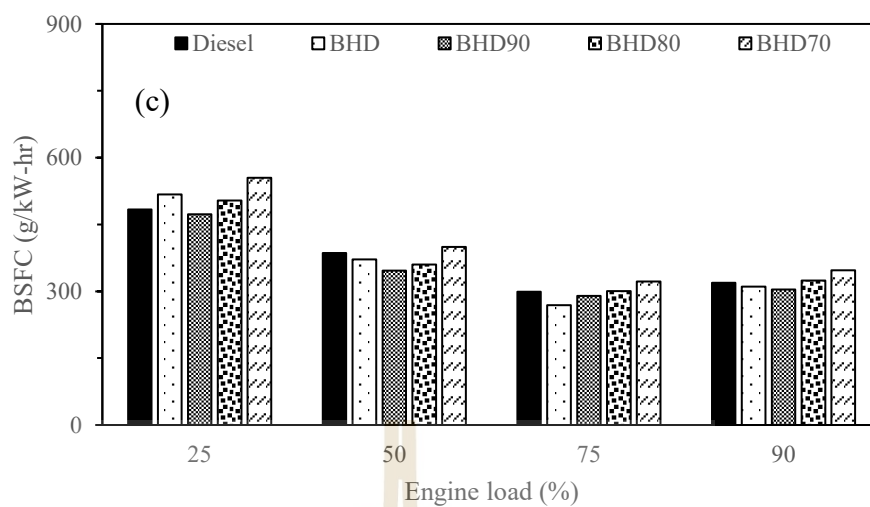
การทดสอบในเครื่องยนต์ชนิดนี้จะใช้เชื้อเพลิงที่ทั้งหมด 5 ชนิดได้แก่ น้ำมันดีเซล B7 ซึ่งใช้เป็นน้ำมันอ้างอิง, BHD, BHD90, BHD80 และ BHD70 โดย BHD90, BHD80 และ BHD70 หมายถึง น้ำมัน BHD ผสมกับไบโอดีเซลในปริมาตร 10%, 20% และ 30% ตามลำดับทดสอบที่โหลด 25%, 50% 75% และ 90% ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,000, 2,500 และ 3,000 RPM ผลแสดงดังต่อไปนี้

5.1.1 สมรรถนะเครื่องยนต์

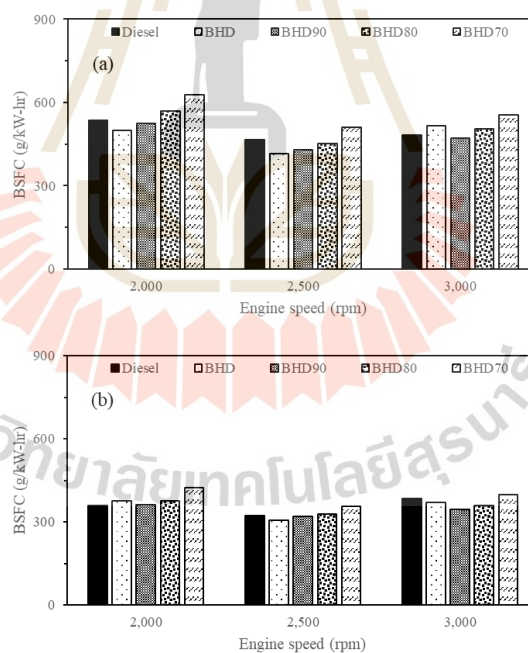
อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรก (BSFC) ของเครื่องยนต์เมื่อใช้งานภายใต้โหลดเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อโหลดเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจาก 25% เป็น 75% BSFC มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบประสิทธิภาพความร้อนเบรก อย่างไรก็ตาม BSFC จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอีกครั้งเมื่อโหลดเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 90% เนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่สูงขึ้นจากการดูดซับความร้อนของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไป [An et al, 2012], [Alahmer et al 2010] อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์เมื่อใช้งานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่า BSFC ของเชื้อเพลิงทั้งหมดมีแนวโน้มต่ำสุดเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 2,500 รอบต่อนาที ตามด้วย 3,000 รอบต่อนาที และ 2,000 รอบต่อนาที ตามลำดับ เนื่องจากที่รอบ 2,500 รอบต่อนาที ปริมาณ

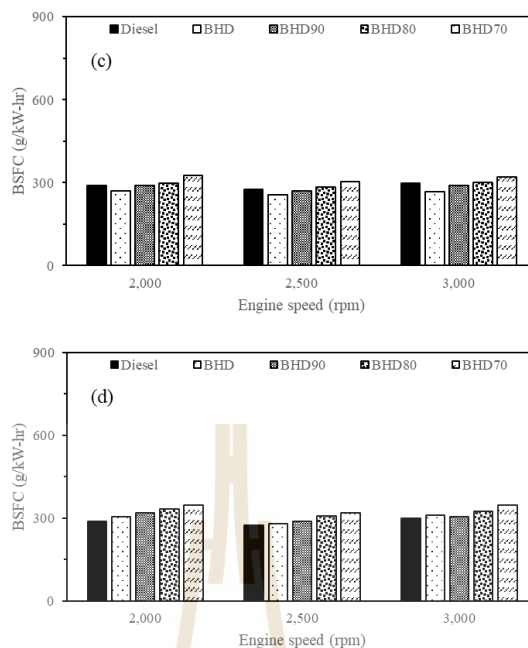
เชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิการเผาไหม้มีความเหมาะสมส่งผลให้มี BTE ที่สูง ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,000 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรคสูง ในขณะที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาทีมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาว ส่งผลให้พลังงานที่ได้ลดลงซึ่งเกิดจากการดูดซับความร้อนของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่มากขึ้น [An et al, 2012], [Alahmer et al 2010] เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงต่าง ๆ พบว่า BSFC เมื่อใช้เชื้อเพลิง BHD มีแนวโน้มต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล ยกเว้นในกรณีของโหลด 25% ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 3,000 รอบต่อนาที เนื่องจากการผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่ดีขึ้นและพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากค่าซีเทนและค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น BSFC จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น เนื่องจากดัชนีซีเทนที่ต่ำลง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำลง และความหนืดที่สูงขึ้น ส่งผลให้การผสมเชื้อเพลิงและอากาศและการกระจายตัวแย่ง [Sakkampang et al, 2023]





รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรกในแต่ละน้ำมัน 2,000 RPM b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM



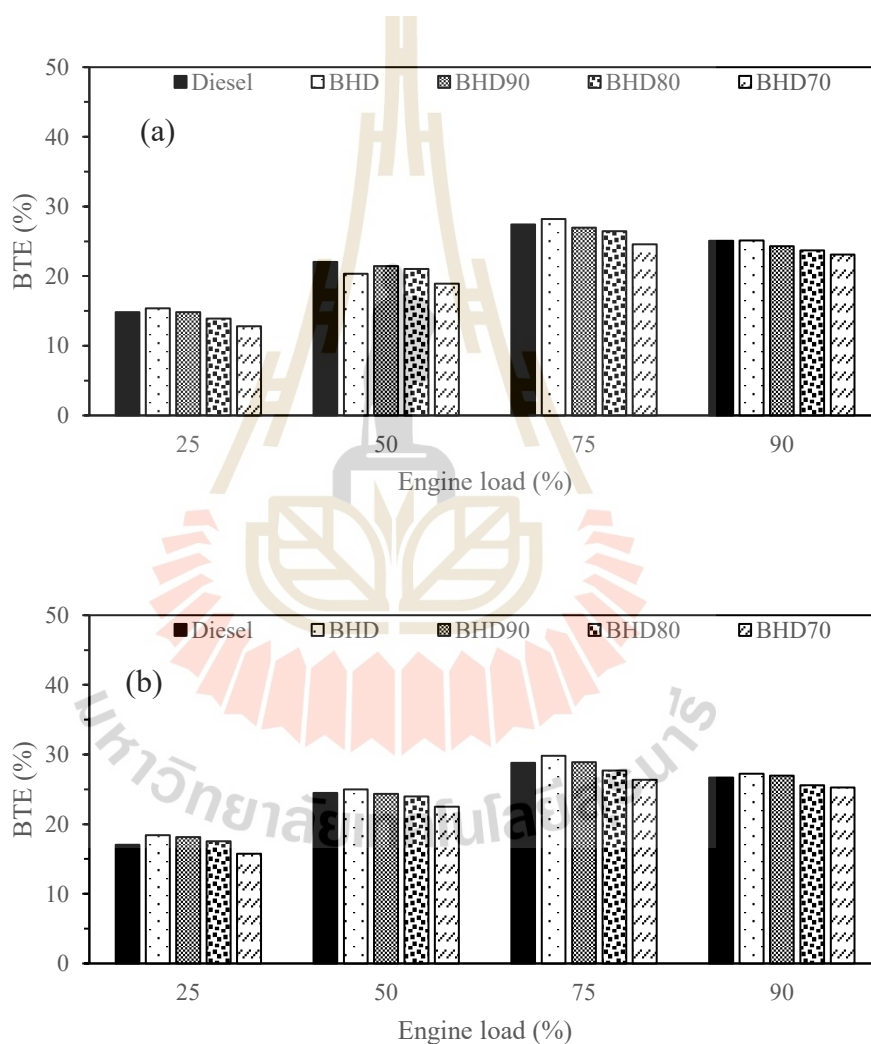


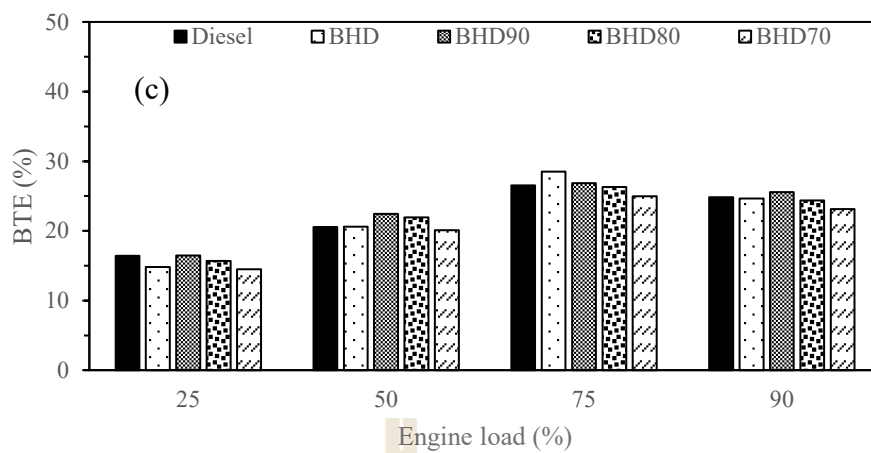
รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรกในแต่ละน้ำมัน a) Load 25% b) Load 50% c) Load 75% d) Load 90%

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ของเครื่องยนต์เมื่อใช้งานภายใต้โหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า BTE ของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อโหลดเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจาก 25% เป็น 75% และลดลงเล็กน้อยเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 90% ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ BSFC นี้เป็นผลมาจากอุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อโหลดเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การแปลงเชื้อเพลิงเป็นพลังงานดีขึ้น ทำให้เครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงน้อยลงเพื่อรักษาการทำงานของเครื่องยนต์ เมื่อโหลดเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 90% มีการฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อรักษาความเร็วรอบเครื่องยนต์ และทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่สูงขึ้นจากการดูดซับความร้อนของเชื้อเพลิง [Bendu et al, 2017]

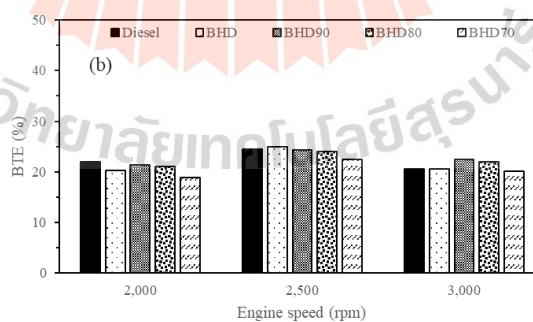
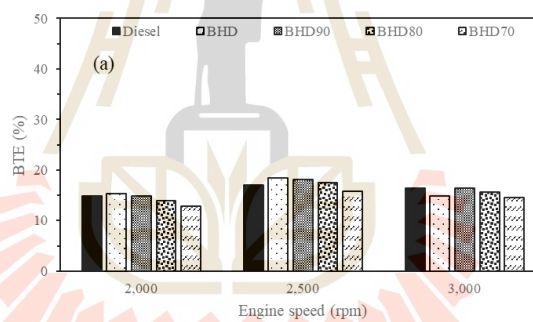
เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ พบว่า BTE เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจาก 2,000 รอบต่อนาที เป็น 2,500 รอบต่อนาที และลดลงอีกครั้งเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เปลี่ยนเป็น 3,000 รอบต่อนาที นี่เป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนที่สูงขึ้นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 3,000 รอบต่อนาที อันเนื่องมาจากการฉีดเชื้อเพลิงที่มากขึ้น และความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวขึ้น อุณหภูมิการเผาไหม้และปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเหมาะสมที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,500 รอบต่อนาที ซึ่งช่วยในการแปลงเชื้อเพลิงเป็นพลังงานและการเริ่มต้นการเผาไหม้ที่เหมาะสม

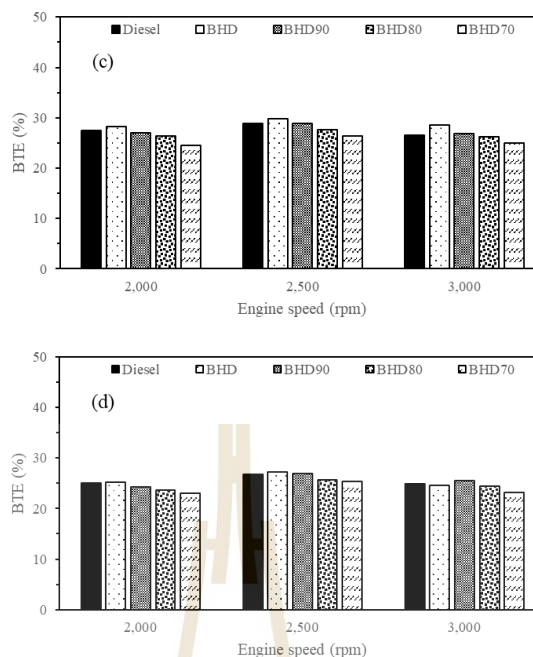
เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงต่าง ๆ พบว่า BHD มีแนวโน้มให้ BTE สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากการผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่ดีขึ้นและค่าความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งช่วยให้การเริ่มต้นการเผาไหม้สั้นลงและพลังงานที่ได้สูงขึ้น [Nabi et al, 2022] ยกเว้นในกรณีของ 1) โหลด 50% ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,000 รอบต่อนาที และ 2) โหลด 25% ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 3,000 รอบต่อนาที การผสมไบโอดีเซลมีแนวโน้มทำให้ BTE ต่ำลงเนื่องจากค่าความร้อนที่ต่ำลง ดัชนีซีเทนที่ต่ำลง และความหนืดที่สูงขึ้นของไบโอดีเซลส่งผลให้การผสมเชื้อเพลิงและอากาศและการกระจายตัวแย่ง [Hassan et al, 2023]





รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละน้ำมัน a) 2,000 RPM b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM



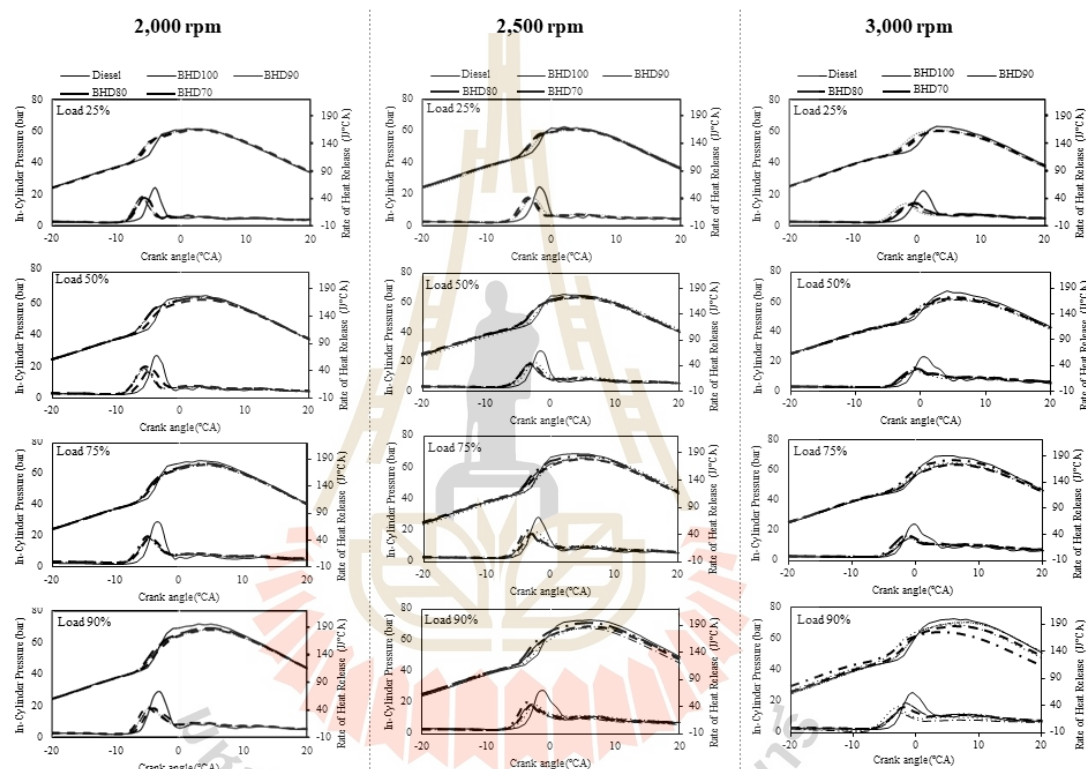


รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละน้ำมัน a) Load 25% b) Load 50% c) Load 75% d) Load 90%

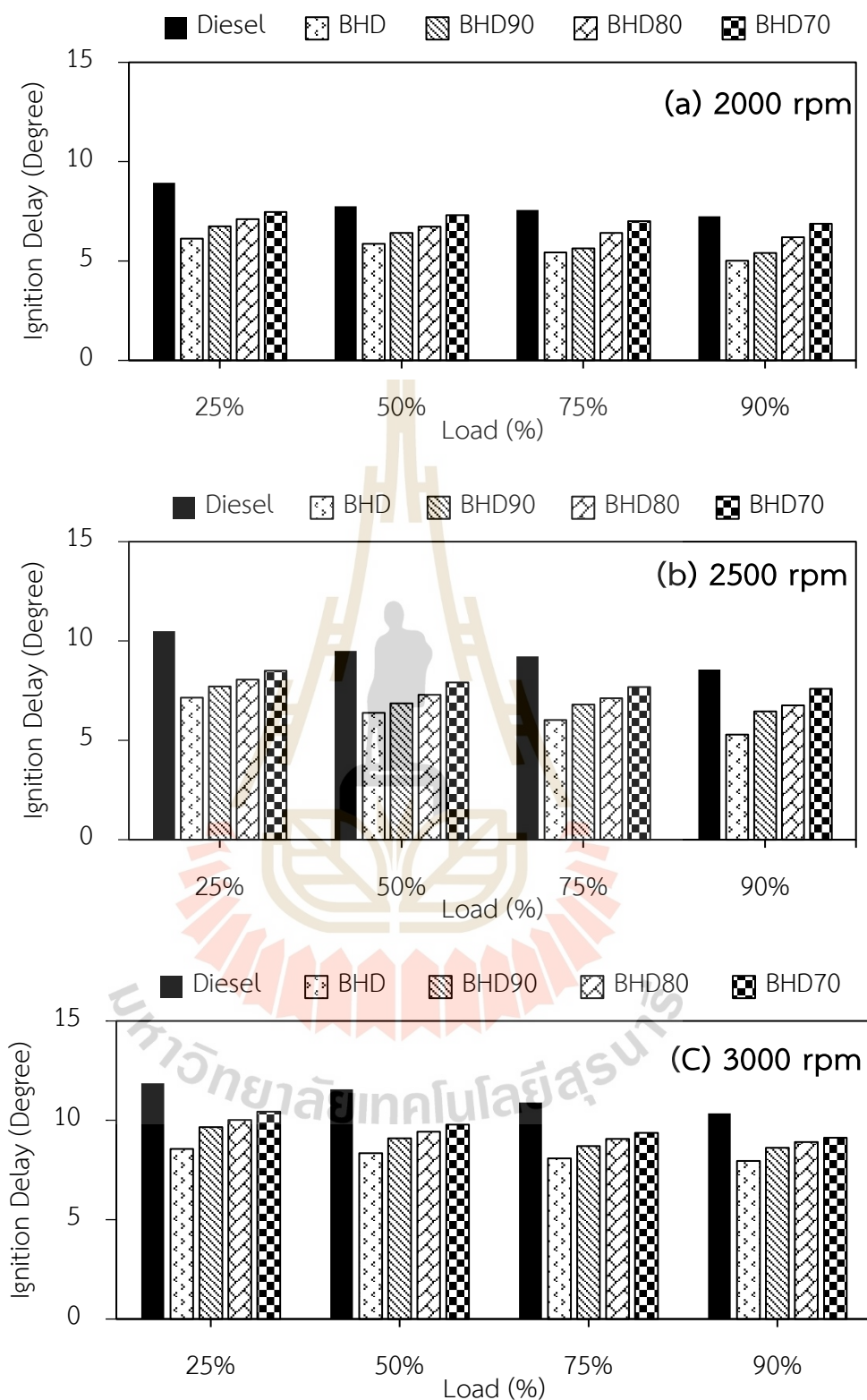
5.1.2 คุณลักษณะการเผาไหม้

ความดันในกระบอกสูบ (ICP) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (HRR) ในแต่ละมุมมองคาเพลลาข้อเหวี่ยงของเชื้อเพลิงทดสอบสำหรับโหลดเครื่องยนต์และความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.5 แนวโน้มของ ICP และ HRR ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ และรูปที่ 5.6 (สามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก) แสดงความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่โหลดต่างกันของน้ำมันแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาทั้งสองรูปควบคู่กันพบว่าค่าสูงสุดของ ICP และ HRR ของน้ำมันดีเซลมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดอื่น ๆ น้ำมันดีเซลมีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวที่สุดจึงมีน้ำมันเชื้อเพลิงที่รอเผาไหม้ในจังหวะ Premixed Combustion ในปริมาณที่มากส่งผลให้การจุดระเบิดจึงมีการปลดปล่อยความร้อนที่สูง ในทางกลับกันน้ำมัน BHD มี ICP และ HRR น้อยเนื่องจากความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นน้ำมันที่รอเผาไหม้ในจังหวะ Premixed Combustion การจุดระเบิดจึงมีการปลดปล่อยความร้อนที่ต่ำและด้วยความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นจะส่งผลให้มีระยะเวลาในการเผาไหม้ที่นานขึ้น ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นของน้ำมัน BHD มีเหตุผลมากจากการผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่ดีขึ้นและการกระจายตัวที่ดีกว่า ซึ่งได้รับผลกระทบจากดัชนีซีเทนที่สูงขึ้นและความหนืดที่ต่ำลง [Hunicz, 2020] การเริ่มต้นการเผาไหม้ที่เร็วขึ้นช่วยให้การแพร่กระจายของเปลวไฟเป็นไปอย่างราบรื่น เสริมสร้างเสถียรภาพในการเผาไหม้และลดปัญหาการ

เผาไหม้ไม่สมบูรณ์และการดับของเปลวไฟ ส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนเป็นไปอย่างราบรื่น และควบคุมได้ ลดความดันสูงสุดในที่สุด เมื่อพิจารณาการเพิ่มไบโอดีเซลใน BHD จะพบว่ามีแนวโน้มลด ICP และ HRR เนื่องจากความหนืดที่สูงขึ้นและค่าความร้อนที่ต่ำรวมถึงความล่าช้าในการจุดระเบิดจะยาวขึ้นเนื่องจากไบโอดีเซลมีค่าดัชนีซีเทนที่ต่ำ ส่งผลให้การกระจายตัวของเชื้อเพลิงแย่ลง และการปลดปล่อยความร้อนลดลงตามลำดับ [Patel et al, 2019] พฤติกรรมของน้ำมันที่กล่าวมาข้างต้นเกิดขึ้นกับความเร็ว 2,000, 2,500 และ 3,000 รอบต่อนาที

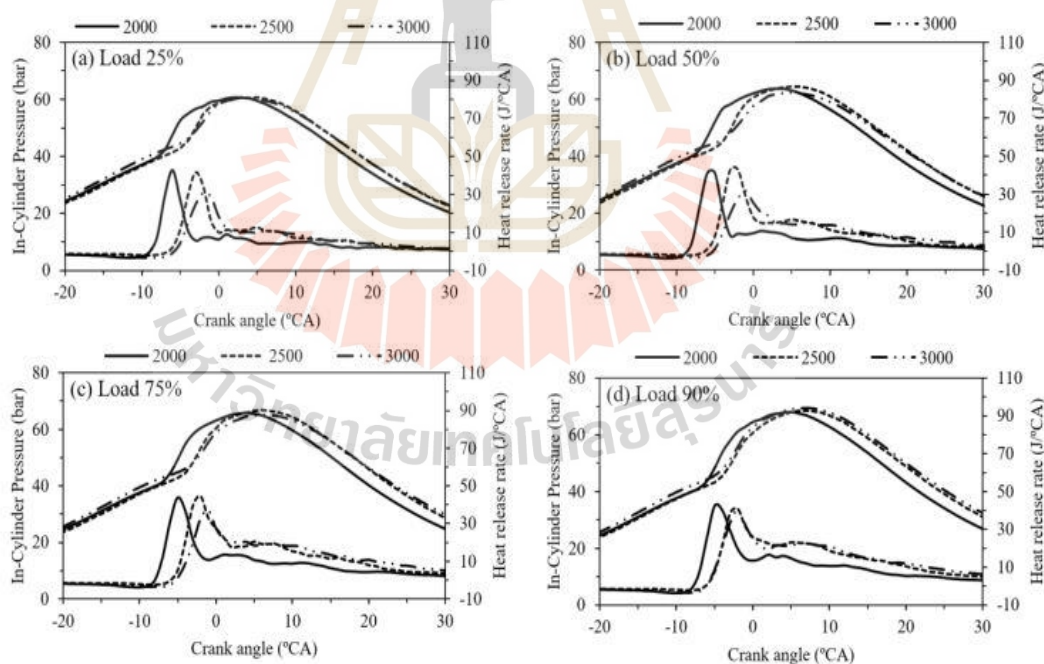


รูปที่ 5.5 ความดันในกระบอกสูบและคุณลักษณะการเผาไหม้เทียบกับองศาเพลวข้อเหวี่ยงของแต่ละน้ำมันที่โหลดต่าง ๆ a) 2,000 RPM b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM

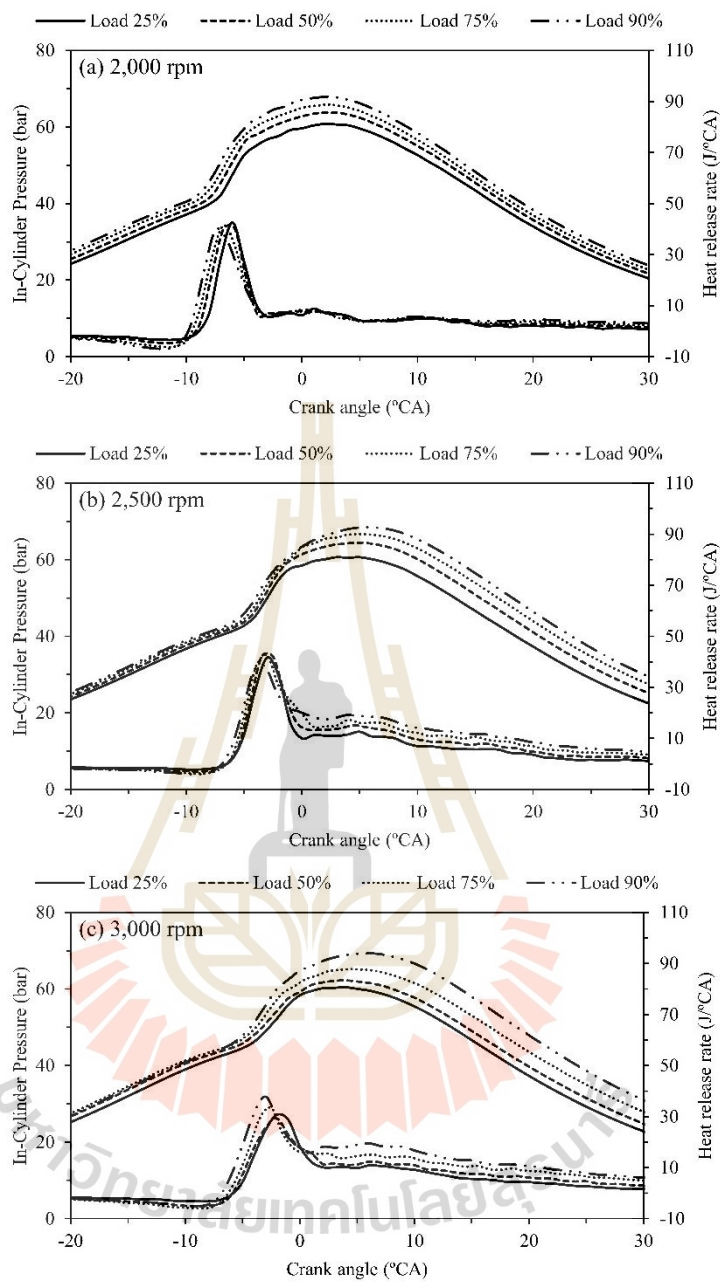


รูปที่ 5.6 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน

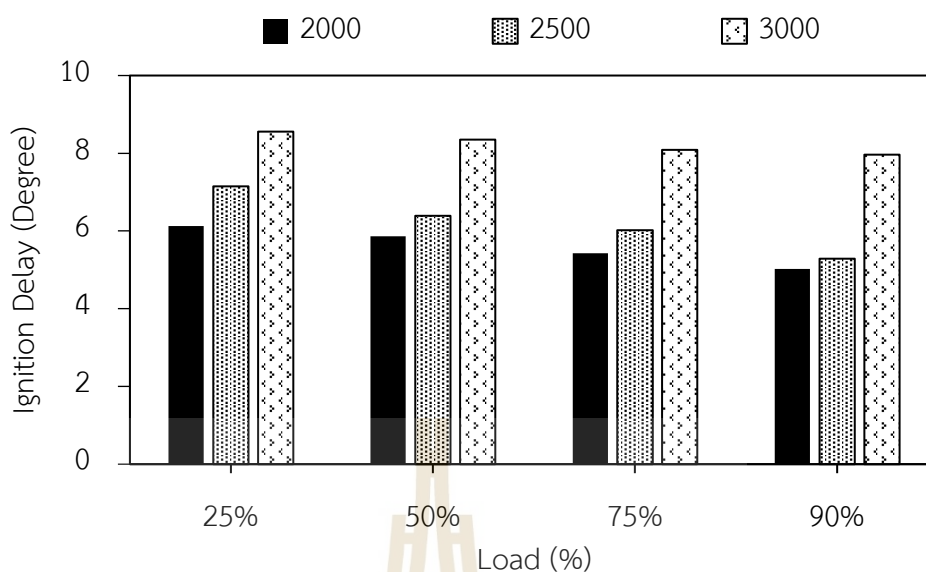
พิจารณาผลกระทบจากการเพิ่มโหลดและความเร็วรอบต่อการเปลี่ยนแปลงของ ICP และ HRR ในแต่ละองศาเฟลาข้อเหวี่ยงของน้ำมัน BHD แสดงดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 และพิจารณาร่วมกับความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของน้ำมัน BHD ที่ความเร็วรอบแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 5.9 (สามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ด) พบว่า ICP และ HRR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเพื่อรักษาการทำงานของเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานมากขึ้น [Patel et al, 2019] นอกจากนี้การเพิ่มโหลดส่งผลให้ความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้นลงเนื่องจากการเผาไหม้ที่รุนแรงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงการดูดซับความร้อนของละอองน้ำมันเชื้อเพลิงกลายเป็นไอจึงทำได้ดีขึ้นเมื่อพิจารณาการเพิ่มความเร็วยรอบที่โหลดต่าง ๆ ของน้ำมัน BHD แสดงดังรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่อความเร็วยรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ICP และ HRR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยพลังงานที่มากขึ้นจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่สูงขึ้น [Nabi et al, 2022] นอกจากนี้ความล่าช้าในการจุดระเบิดจะยาวขึ้นเมื่อความเร็วยรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงมีเวลาน้อยลงในการผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ส่งผลให้ระยะเวลาการเผาไหม้สั้นลง



รูปที่ 5.7 ความดันในกระบอกสูบคุณลักษณะการเผาไหม้เทียบกับองศาเฟลาข้อเหวี่ยงของน้ำมัน BHD ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน a) Load 25% b) Load 50% c) Load 75% d) Load 90%



รูปที่ 5.8 ความดันในกระบอกสูบและคุณลักษณะการเผาไหม้เทียบกับองศาเพลาคือของน้ำมัน BHD ที่โหลดแตกต่างกัน a) 2,000 RPM b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM

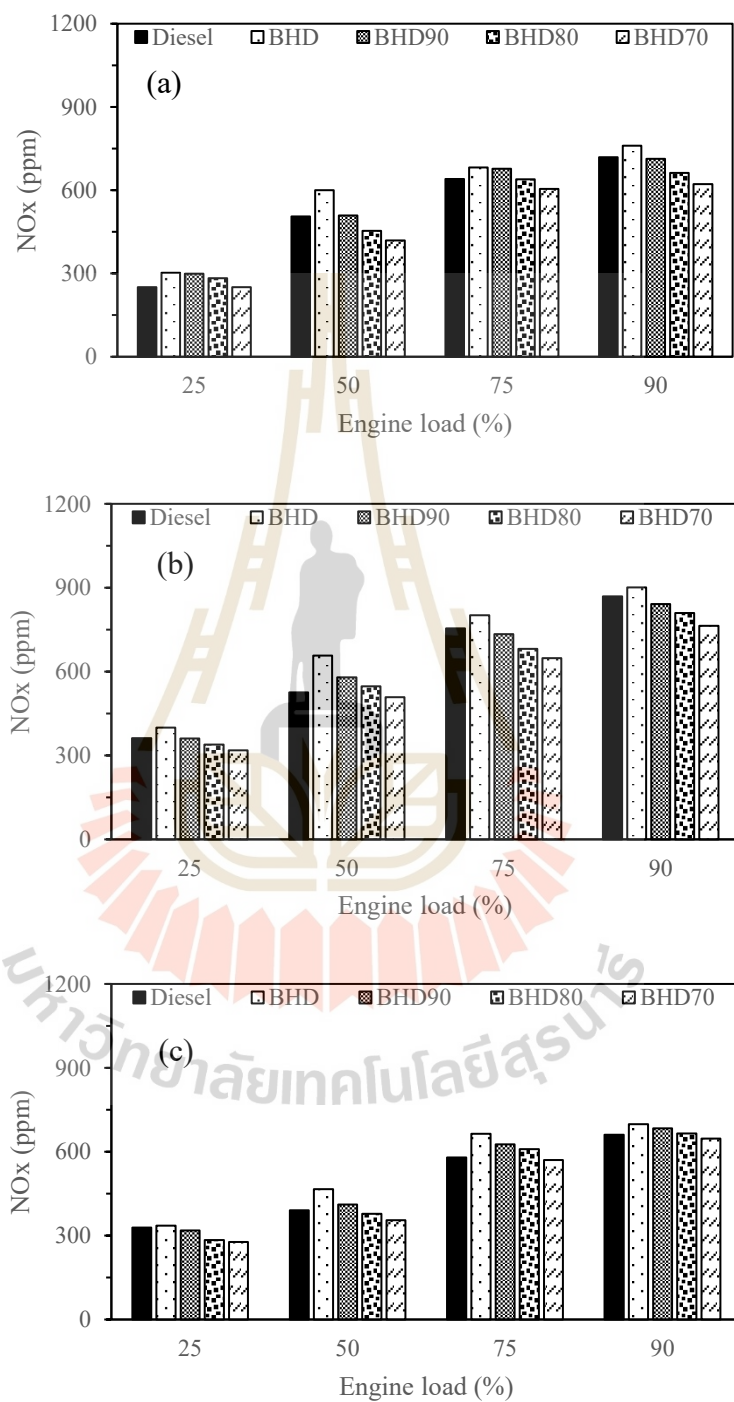


รูปที่ 5.9 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของน้ำมัน BHD ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน

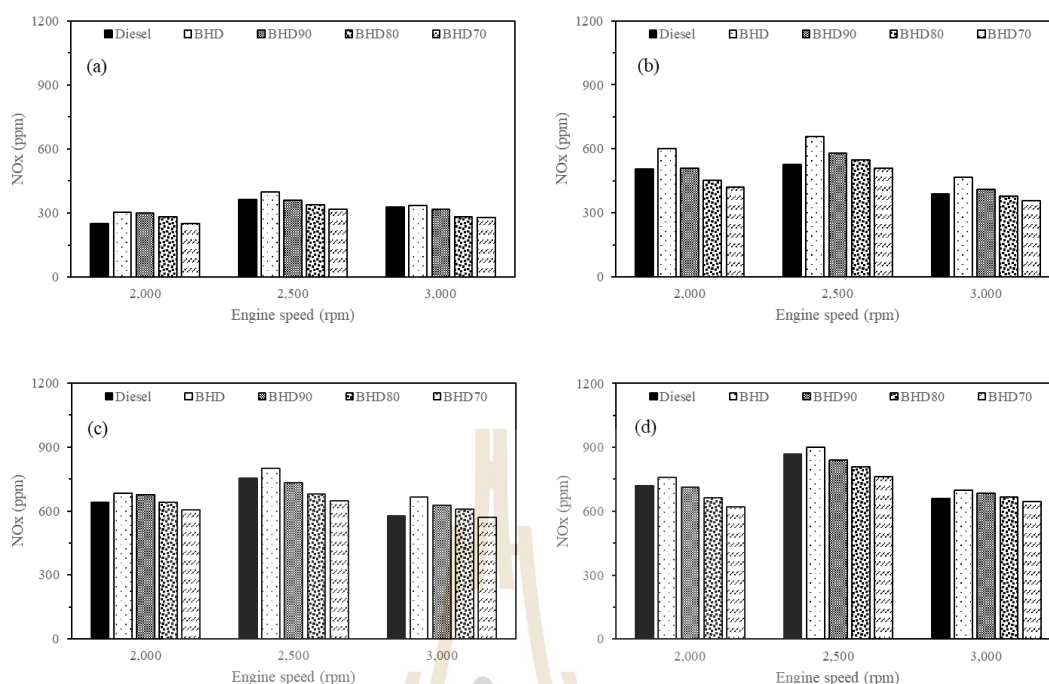
5.1.3 มลพิษไอเสีย

ปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) จากเครื่องยนต์เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะมีโหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ แนวโน้มแสดงให้เห็นว่าการปล่อย NOx เพิ่มขึ้นเมื่อโหลดเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิการทำงานที่สูงขึ้น ซึ่งเกิดจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้เพื่อรักษาความเร็วรอบเครื่องยนต์ [Bendu et al, 2017] เมื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ พบว่าการปล่อย NOx ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที ต่ำกว่าเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ทดสอบเมื่อเทียบกับความเร็ว 2,500 และ 3,000 รอบต่อนาที เนื่องจากมีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ การปล่อย NOx เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 2,500 รอบต่อนาที เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้นจากการเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงในระหว่างการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 3,000 รอบต่อนาที การปล่อย NOx ลดลงอีกครั้ง อาจเป็นเพราะการฉีดเชื้อเพลิงที่มากเกินไปในห้องเผาไหม้ซึ่งดูดซับความร้อน ทำให้อุณหภูมิในกระบอกสูบต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงต่าง ๆ พบว่า BHD แสดงการปล่อย NOx สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากระยะเวลาการเผาไหม้นานขึ้น ทำให้โมเลกุลไนโตรเจนและออกซิเจนมีเวลามากขึ้นในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิด NOx เพิ่มขึ้น แนวโน้มการปล่อย NOx ลดลงเมื่อมีไบโอดีเซลผสมในเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนืดที่สูงขึ้น ทำให้การกระจายตัวของเชื้อเพลิงแย่ลง นอกจากนี้ ระยะเวลาการเผาไหม้ที่สั้นลงของเชื้อเพลิงผสมสามารถเห็นได้จากดัชนี

ซีเทนที่ต่ำลงของไบโอดีเซล ส่งผลให้การปล่อย NOx ลดลง เนื่องจากเวลาที่ลดลงในการเกิด NOx [Patel et al, 2019]



รูปที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับออกไซด์ของไนโตรเจนในแต่ละน้ำมัน a) 2,000 RPM b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM

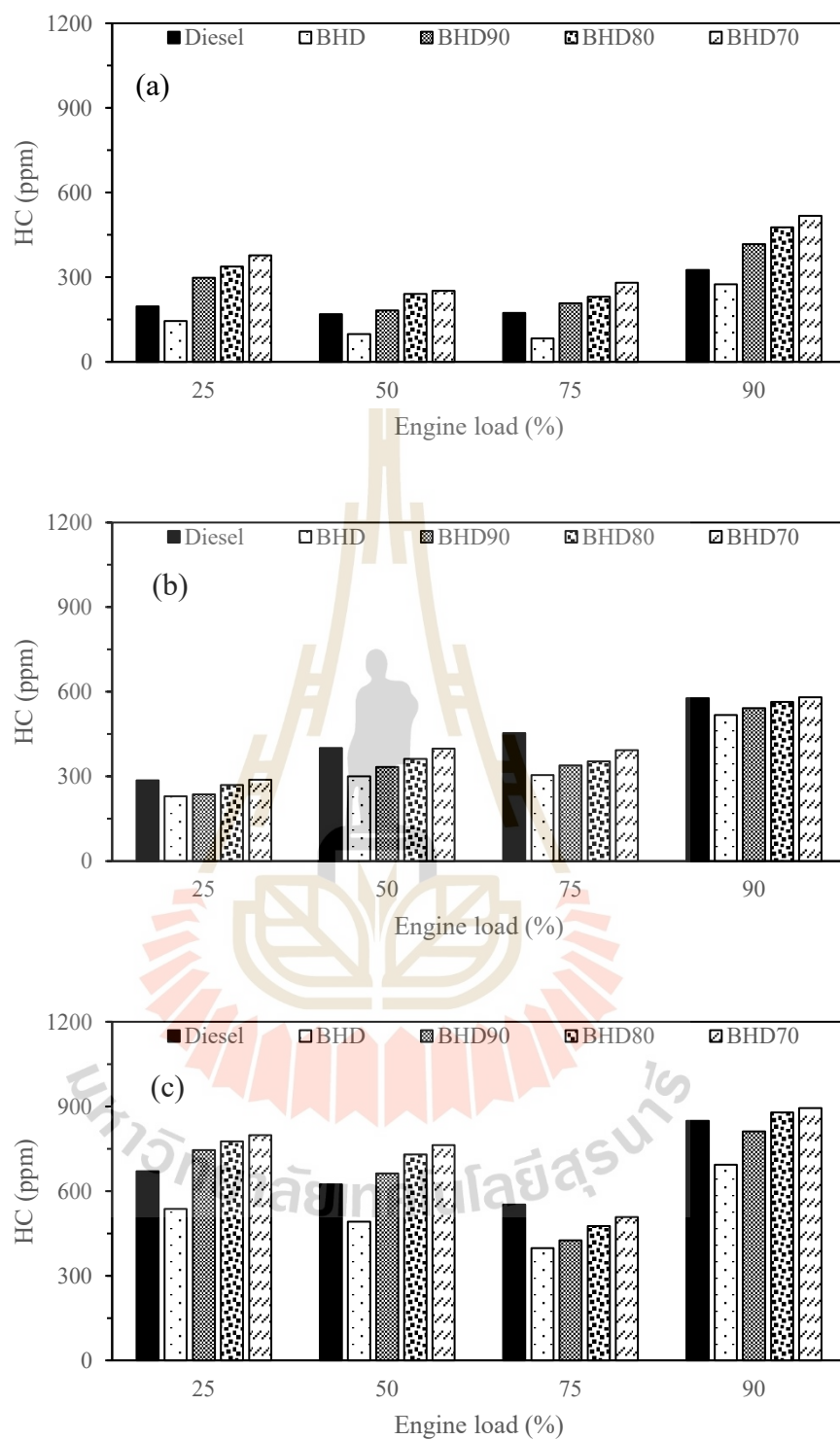


รูปที่ 5.11 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบกับออกไซด์ของไนโตรเจนในแต่ละน้ำมัน
a) Load 25% b) Load 50% c) Load 75% d) Load 90%

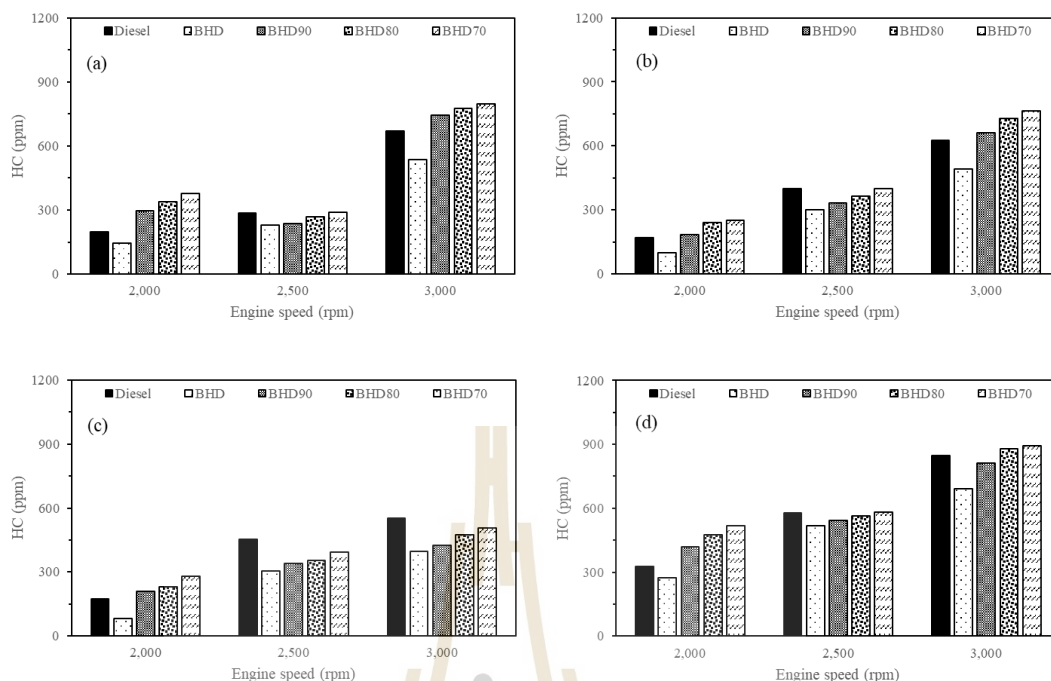
การปล่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (HC) จากเครื่องยนต์เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะมีโหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าการเพิ่มโหลดเครื่องยนต์จาก 25% เป็น 75% มีแนวโน้มการปล่อยมลพิษไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ชัดเจนในทุกความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็นผลมาจากความแตกต่างในอุณหภูมิการทำงานภายในกระบอกสูบ ที่โหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำ อุณหภูมิในกระบอกสูบอาจต่ำเกินไปสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพ ในทางกลับกัน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ปานกลาง (2,500 RPM) อุณหภูมิการเผาไหม้อาจเหมาะสม ส่งผลให้การปล่อย HC ต่ำลง อย่างไรก็ตาม ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูง (3,000 RPM) การฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้มากเกินไปอาจส่งผลให้การปล่อย HC สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการปล่อย HC สูงสุดที่โหลดเครื่องยนต์ 90% ในทุกความเร็วรอบเครื่องยนต์ อาจเกิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่มากเกินไปเพื่อรักษาความเร็วรอบเครื่องยนต์ การปล่อย HC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงขึ้น เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเพื่อรักษาการทำงานของเครื่องยนต์ ยกเว้นที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาทีที่โหลดเครื่องยนต์ 25% ซึ่งการปล่อย HC ต่ำลงอาจเกิดจากการทำงานของเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ พบว่า BHD แสดงการปล่อย HC ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล และเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากมีสารประกอบพาราฟิน สารประกอบเหล่านี้มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพันธะเดี่ยวทำให้การแตกตัวของพันธะทำได้ง่ายกว่า การเผาไหม้จึงมีประสิทธิภาพดีขึ้น [Hemanandh et al, 2015], [Dobrzynska et al, 2020] การผสมไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มทำให้การปล่อย HC สูงขึ้นเนื่องจากสองปัจจัยหลักได้แก่ 1) ค่าความร้อนที่ต่ำกว่าของไบโอดีเซลทำให้ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเพื่อรักษาการทำงานของเครื่องยนต์ และ 2) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไบโอดีเซลที่สูงจึงต้องการความร้อนมากขึ้นสำหรับการระเหยเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนสำหรับการปล่อย HC จากเชื้อเพลิงผสมเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,000 รอบต่อนาที การปล่อย HC จากเชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากอุณหภูมิการทำงานของเครื่องยนต์ต่ำกว่า (ดูได้จากกราฟการปลดปล่อยความร้อนรูปที่ 5.5) ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการระเหยของเชื้อเพลิงผสม ร่วมกับค่าความร้อนที่ต่ำกว่าของเชื้อเพลิงผสมทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อรักษาการทำงานของเครื่องยนต์ เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเป็น 2,500 รอบต่อนาที อุณหภูมิการเผาไหม้สูงพอมากพอสำหรับการระเหยของเชื้อเพลิงผสม ส่งผลให้การปล่อย HC จากเชื้อเพลิงผสมต่ำลง ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 3,000 รอบต่อนาที การปล่อย HC จากเชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ยกเว้นที่โหลดเครื่องยนต์ 75% ซึ่งการปล่อย HC จากเชื้อเพลิงผสมต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล อาจเป็นเพราะการบรรลุสภาวะการทำงานที่เหมาะสม





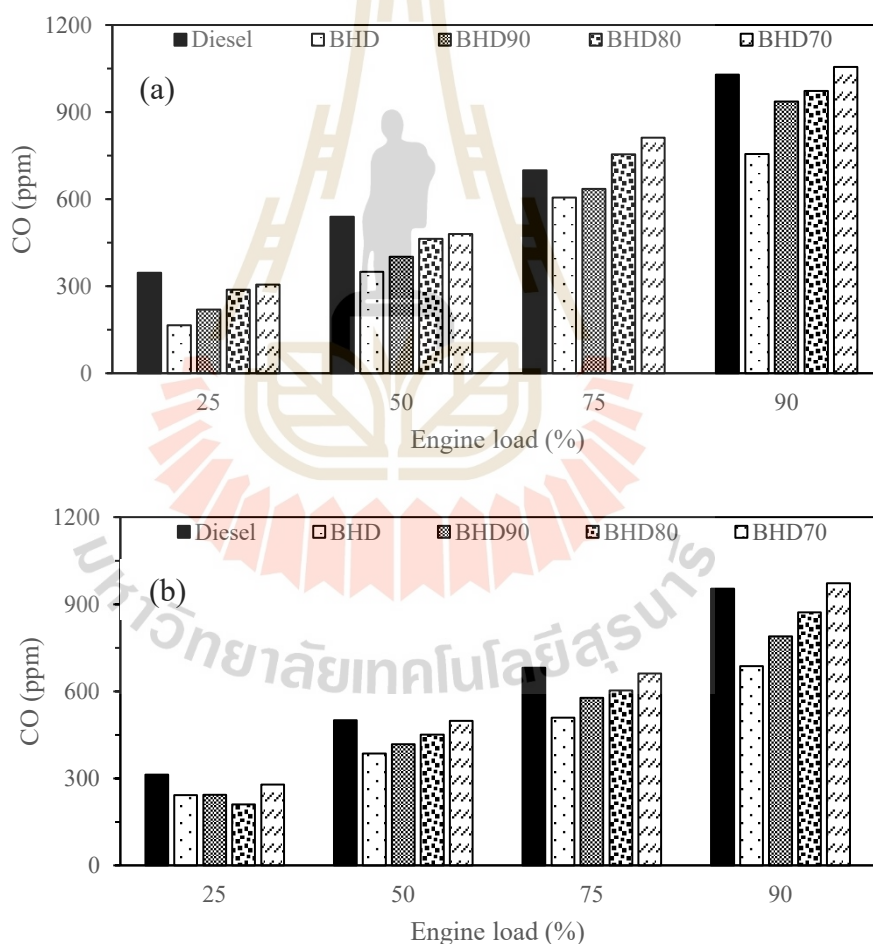
รูปที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับไฮโดรคาร์บอนในแต่ละน้ำมัน a) 2,000 RPM b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM

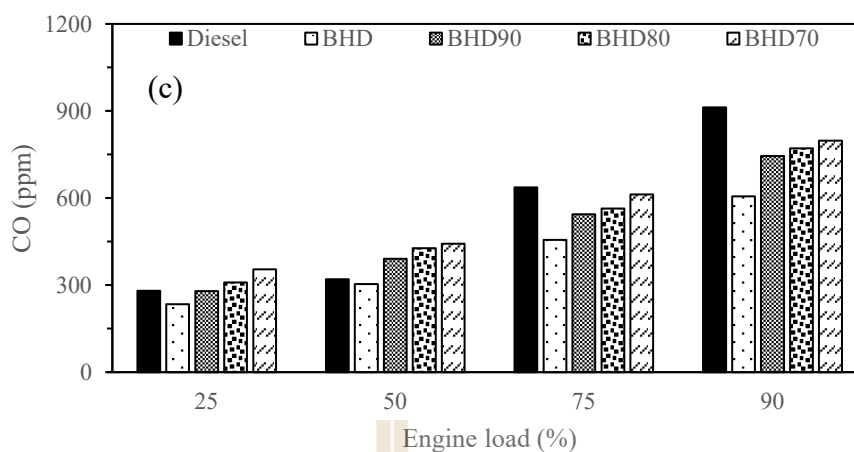


รูปที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบกับไฮโดรคาร์บอนในแต่ละน้ำมัน a) Load 25% b) Load 50% c) Load 75% d) Load 90%

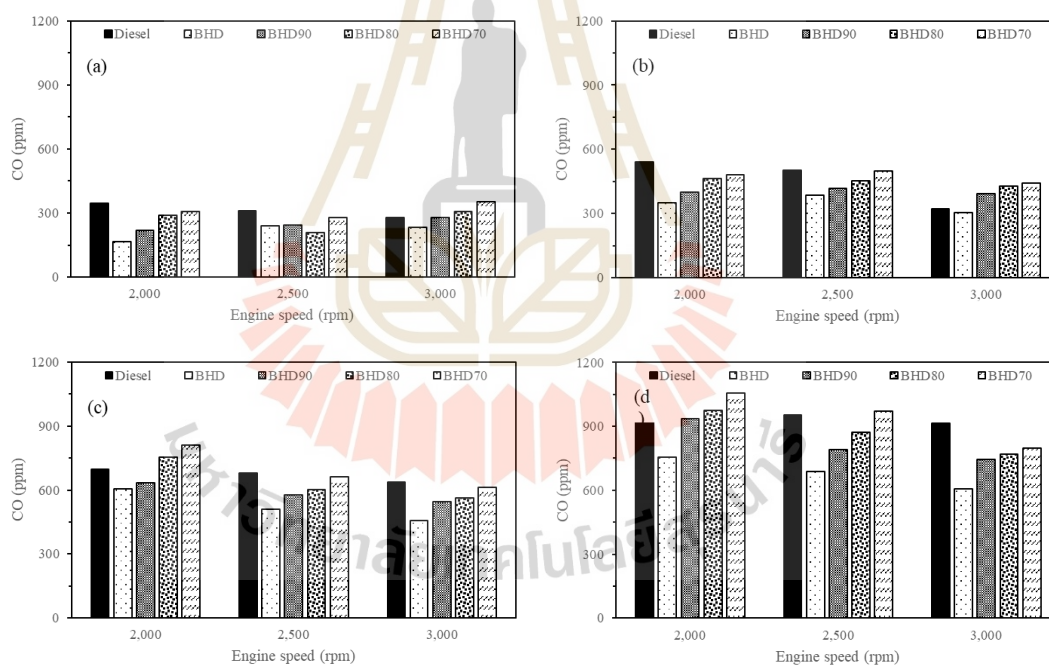
การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากเครื่องยนต์เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะมีโหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 ตามลำดับ จากผลการทดสอบได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดเครื่องยนต์และการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยการเพิ่มโหลดเครื่องยนต์ทำให้การปล่อย CO สูงขึ้น เนื่องจากการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยส่วนผสมเชื้อเพลิงและอากาศที่สูงขึ้น (มีการฉีดน้ำมันเพิ่มมากขึ้น) เพื่อรักษาความเร็วรอบเครื่องยนต์ ซึ่งสนับสนุนให้เกิด CO มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ระหว่างการเผาไหม้ [Abed et al, 2019], [Mangesh et al, 2020] ในทางกลับกัน การเพิ่มความเร็วยรอบเครื่องยนต์ส่งผลให้การปล่อย CO ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีซึ่งเกิดจากการก่อให้เกิดความปั่นป่วนของอากาศและการผสมในห้องเผาไหม้ที่ดีขึ้น รวมถึงระยะเวลาการเผาไหม้ที่สั้นลง [İlkiliç et al, 2012] ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นมักส่งผลให้การปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ตรงกันข้ามกับความคาดหวังกนี้ การปล่อย CO ลดลงเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงขึ้น อาจเป็นเพราะอิทธิพลที่เด่นชัดกว่าของการไหลแบบปั่นป่วนและการผสมอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เมื่อเทียบกับอัตราการฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น BHD แสดงการปล่อย CO ที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบ เนื่องจากไม่มีสารประกอบอะโรมาติก ทำให้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น [Zubel et al, 2016] เช่นเดียวกัน เชื้อเพลิงผสมมักจะให้การปล่อย CO ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซล เป็นหลักเนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่สูงขึ้นและการเริ่มต้นการเผาไหม้ก่อนเวลา แม้ว่าอาจมีข้อบกพร่องในบางความเร็วรอบเครื่องยนต์และโหลด เช่น ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 3,000 รอบต่อนาทีที่โหลดเครื่องยนต์ 25% และ 50% อาจเป็นเพราะอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ไม่เพียงพอขัดขวางการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนและส่งผลให้เกิด CO แทนที่จะเป็น CO₂ ระหว่างการเผาไหม้ นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมมีแนวโน้มทำให้การปล่อย CO สูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้อาจเป็นผลมาจากค่าความหนืดที่สูงขึ้นของไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การกระจายตัวของเชื้อเพลิง นอกจากนี้ ไบโอดีเซลมักจะแสดงอัตราส่วน H/C ที่ต่ำกว่า ซึ่งมีแนวโน้มส่งเสริมการเกิด CO มากกว่า H₂O ระหว่างกระบวนการเผาไหม้ [Patel et al, 2019]





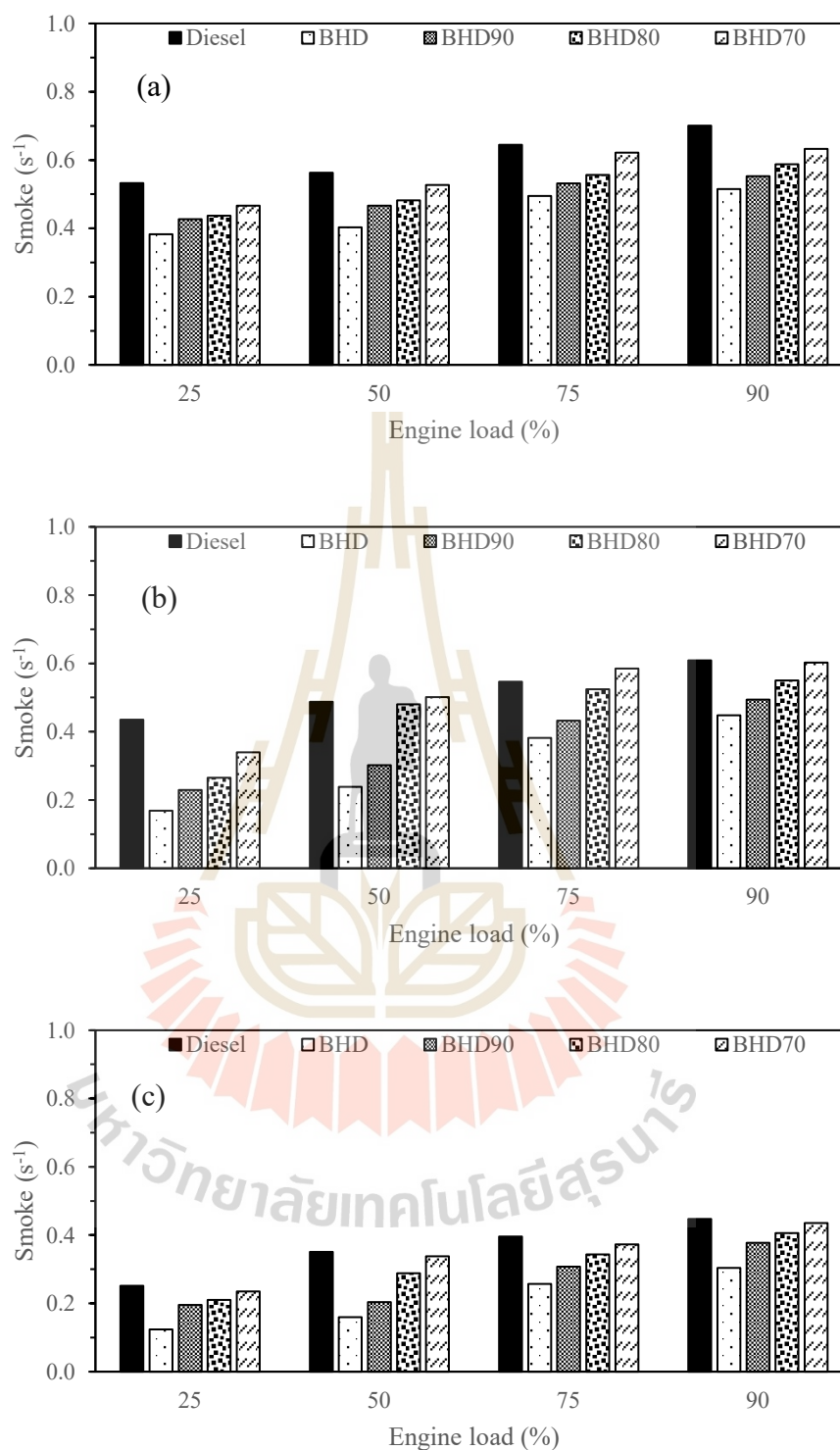
รูปที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในแต่ละน้ำมัน a) 2,000 RPM
b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM



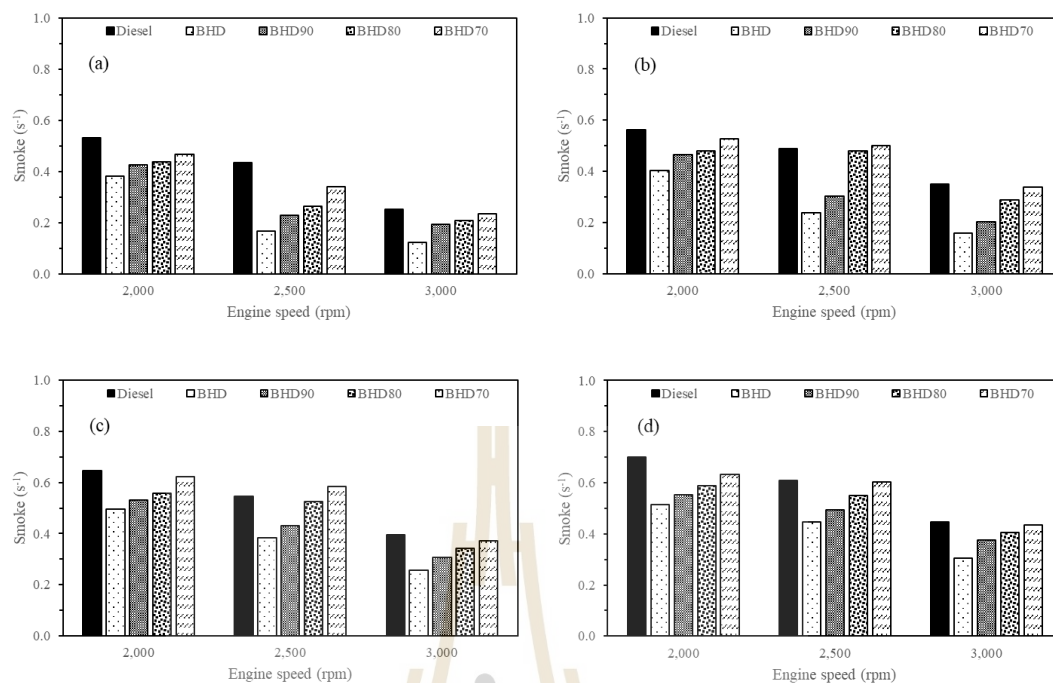
รูปที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบกับคาร์บอนมอนอกไซด์ในแต่ละน้ำมัน a) Load 25% b) Load 50% c) Load 75% d) Load 90%

การปล่อยควันดำจากเครื่องยนต์เมื่อใช้งานภายใต้สภาวะมีโหลดและความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17 ตามลำดับ การปล่อยควันดำมักเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดเครื่องยนต์สูงขึ้นเนื่องจากปัจจัยหลายประการ ประการแรก การเพิ่มโหลดมีการใช้เชื้อเพลิงที่สูงขึ้นระหว่างการเผาไหม้มีส่วนทำให้การปล่อยควันดำเพิ่มขึ้น ประการที่สอง ความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สั้นลงอาจจำกัดเวลาที่ใช้ในการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างเหมาะสมในห้องเผาไหม้ นำไปสู่การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและการปล่อยควันดำ นอกจากนี้การเผาไหม้ล่วงหน้าสามารถเพิ่มอุณหภูมิในกระบอกสูบ ซึ่งช่วยให้การก่อตัวของอนุภาคเขม่าลดลงเนื่องจากเขม่าควันดำได้สลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง การปล่อยควันดำแสดงแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้นของเครื่องยนต์และการเพิ่มความปั่นป่วนในห้องเผาไหม้

ความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นนี้มีส่วนช่วยให้การผสมกันระหว่างน้ำมันกับอากาศทำได้ดีขึ้นส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และลดการก่อตัวของอนุภาคเขม่า ซึ่งน้ำมัน BHD มักจะแสดงการปล่อยควันที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเนื่องจากมีปริมาณอะโรมาติกที่น้อยกว่าน้ำมันดีเซล สารประกอบอะโรมาติกทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นในการก่อตัวของเขม่าในระหว่างการเผาไหม้ [Zubel et al, 2016] การเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของการปล่อยควัน นี่อาจเป็นผลจากความหนืดที่สูงขึ้นของไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของเชื้อเพลิงแย่ลง ทำให้หยดเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ขึ้นและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ [Patel et al, 2019] ข้อสังเกตสำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้พบลักษณะเชิงลบของการกระจายตัวของเชื้อเพลิงนี้เอาชนะผลกระทบของการมีออกซิเจนและการไม่มีอะโรมาติกในไบโอดีเซลต่อการปรับปรุงการออกซิเดชันของเขม่าและการลดสารตั้งต้นของเขม่า



รูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงโหลดเปรียบเทียบกับควันทำในแต่ละน้ำมัน a) 2,000 RPM b) 2,500 RPM c) 3,000 RPM



รูปที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเปรียบเทียบกับควันทำในแต่ละน้ำมัน a) Load 25% b) Load 50% c) Load 75% d) Load 90%

บทที่ 6

ผลการทำนายโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

ในงานวิจัยนี้ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปัญหาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ก่อนทำการหาค่าที่เหมาะสม ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการตามตัวแปรอินพุต ได้แก่ อัตราส่วนของไบโอดีเซลที่เติมใน BHD ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM) และโหลดของเครื่องยนต์ (%) โดยมีตัวแปรเอาต์พุต ได้แก่ สมรรถนะของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษไอเสียที่วัดได้ในการทดลอง และสำหรับอัลกอริธึมที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นคืออัลกอริธึมวิวัฒนาการที่มีการนำทางเวกเตอร์อ้างอิง (RVEA) ถูกนำมาใช้ร่วมกับกับโครงข่ายประสาทเทียมการถดถอยทั่วไป (GRNNs) ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมนี้เหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีจำนวนข้อมูลเล็กน้อยเพื่อใช้หาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

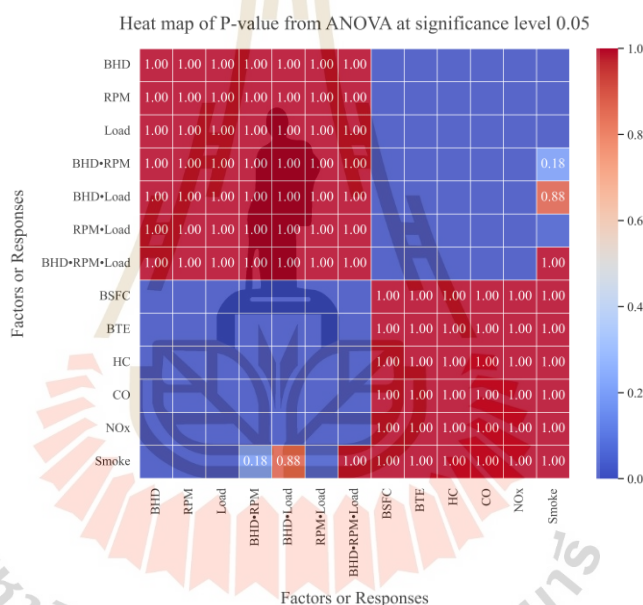
6.1 การหาผลกระทบของตัวแปรอินพุตต่อตัวแปรเอาต์พุต

ในงานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของการผสมน้ำมัน BHD กับน้ำมันไบโอดีเซลที่สัดส่วนที่แตกต่างกัน นำเชื้อเพลิงมาทดสอบกับเครื่องยนต์ที่โหลดและความเร็วรอบที่แตกต่างกันเพื่อประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษ การหาอัตราส่วนผสมของน้ำมันที่เหมาะสมในการใช้กับเครื่องยนต์ จึงมีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด

ก่อนทำการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมนั้นจะต้องศึกษาผลกระทบของตัวแปรอินพุตต่อเอาต์พุตโดยที่ตัวแปรเอาต์พุตจะต้องได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากตัวแปรอินพุต ดังนั้นก่อนที่จะเริ่มการหาค่าที่เหมาะสม ผลกระทบของตัวแปรอินพุต เช่น อัตราส่วนน้ำมันไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD (%) (ตัวเลขด้านหลัง BHD แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของน้ำมัน BHD ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซล), ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM) และโหลด (%) ที่มีผลกระทบต่อตัวแปรเอาต์พุต เช่น อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรก (BSFC) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (BTE) ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และเขม่าควันดำ ซึ่งศึกษาผลกระทบตัวแปรอินพุตต่อเอาต์พุตโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของแผนภาพความร้อนของค่า P-Value เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นตามรูปที่ 6.1 ผลลัพธ์ของ ANOVA แสดงผลกระทบของตัวแปรอินพุตต่ออินพุตและตัวแปรเอาต์พุตต่อเอาต์พุตจะมีค่า P-Value เท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าผลกระทบของตัวแปรไม่มีนัยสำคัญในขณะที่ค่า

P-Value ของความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีค่าที่ต่ำกว่า 0.05 (หมายถึงตัวแปรอินพุตมีผลกระทบต่อเอาต์พุต) จะไม่ปรากฏตัวเลขขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าตัวแปรอินพุตหลักมีผลกระทบต่อตัวแปรเอาต์พุตทั้งหมดในขณะที่ตัวแปรปฏิสัมพันธ์ (Interaction Variable) ระหว่างตัวแปรอินพุตส่วนใหญ่ส่งผลต่อตัวแปรเอาต์พุต ยกเว้นตัวแปรเอาต์พุตการปล่อยเขม่าควันดำซึ่งได้รับผลกระทบจากตัวแปรปฏิสัมพันธ์ระหว่าง RPM และโหลด (%) เท่านั้น เพื่อให้การอธิบายทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตง่ายขึ้น ตัวแปรอินพุตจะถูกแทนที่ด้วยตัวห้อยตัวแปร “I” โดยมีตัวเลข 1, 2 และ 3 ระบุลำดับของตัวแปรที่กล่าวถึงข้างต้น ในขณะที่ตัวแปรเอาต์พุตถูกแทนที่ด้วยตัวแปร “O” ตัวห้อยที่มีตัวเลข 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เป็นตัวแทนของตัวแปรที่กล่าวข้างต้นด้วย



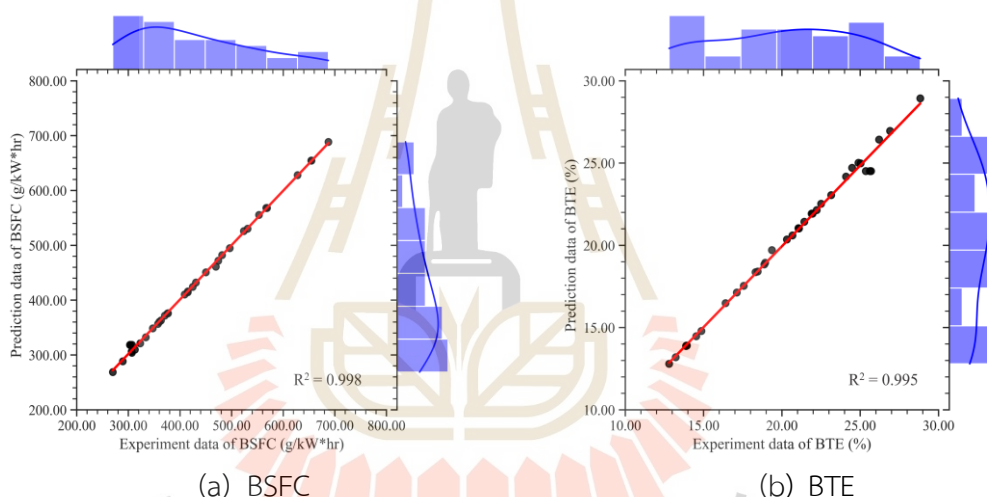
รูปที่ 6.1 P-Value ในโปรแกรม ANOVA

6.2 ประสิทธิภาพของแบบจำลอง GRNNs แทนที่ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

แบบจำลอง GRNNs ถูกนำมาใช้ในการหาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์และผลลัพธ์ของแบบจำลองในกรณีสมรรถนะของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษแสดงในรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ ผลการทำนายของแบบจำลอง GRNNs เทียบกับผลการทดสอบแสดงเป็นกราฟการถดถอย (Regression Plot) และกราฟการกระจายตัว (Distribution Plot) พิจารณาผลการทำนายประสิทธิภาพของเครื่องยนต์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BSFC และ BTE มีผลการทำนาย

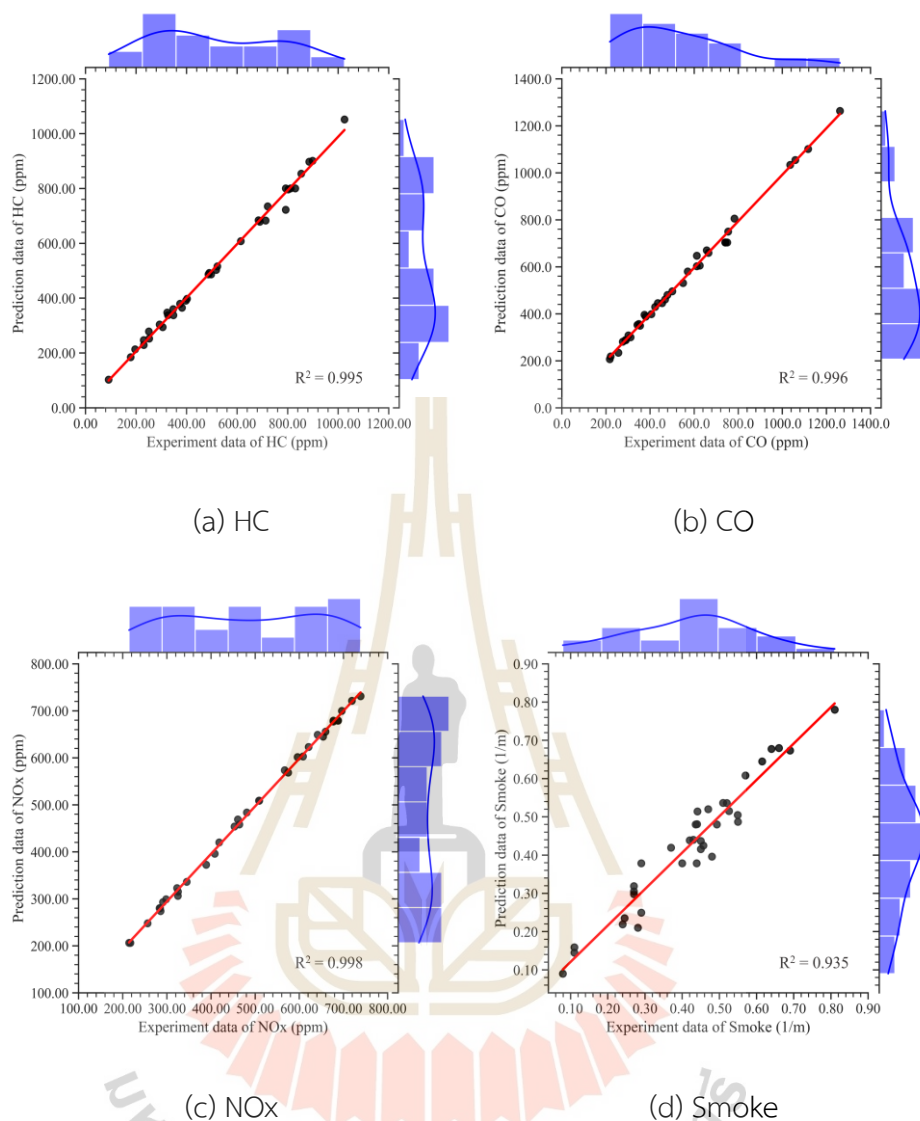
แม่นยำ เมื่อพิจารณา **รูปที่ 6.2a** ประสิทธิภาพการทำนายผล BSFC พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.998 ในขณะที่ MAPE(%) เท่ากับ 0.67% หากพิจารณาแผนภาพการกระจายตัวร่วมด้วยพบว่า การกระจายของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะการกระจายตัวใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองมากซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลอง

เมื่อพิจารณา **รูปที่ 6.2b** ประสิทธิภาพการทำนายผล BTE พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.995 ในขณะที่ค่า MAPE(%) เท่ากับ 0.62% หากพิจารณาแผนภาพการกระจายตัวร่วมมีลักษณะเหมือนกับ BSFC สำหรับการวัดค่า R^2 นั้นไม่มีเกณฑ์ที่แน่นอนในการพิจารณาว่าค่าใดที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองส่วนใหญ่จะตัดสินใจโดยพิจารณาจากค่า MAPE(%) และตามงานวิจัยของ Lewis [Lewis et al, 1982] แบบจำลอง GRNNs บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการทำนายสูงในกรณีของผลลัพธ์ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ($\text{MAPE}(\%) < 10\%$)



รูปที่ 6.2 ผลการทำนายตัวแปรเอาต์พุตสมรรถนะเครื่องยนต์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GRNNs เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

เมื่อพิจารณา **รูปที่ 6.3a** การทำนายผล HC พบว่าแบบจำลอง GRNNs ทำนายการปล่อย HC มีค่า R^2 เท่ากับ 0.995 และค่า MAPE(%) เท่ากับ 3.13% หากพิจารณากราฟการกระจายตัวพบว่าแบบจำลองได้ทำนายแตกต่างจากข้อมูลการทดลองเล็กน้อย และตัวชี้วัดการปล่อยก๊าซอื่นๆ เช่น CO และ NOx มีค่า R^2 ที่สูง (มากกว่า 0.99) ยกเว้นการปล่อยเขม่าควันดำดำที่มี R^2 แตกต่างเล็กน้อยเนื่องจากความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง สำหรับผลการทำนายของ CO (**รูปที่ 6.3b**) แบบจำลองมี R^2 เท่ากับ 0.996 โดยมี MAPE(%) เท่ากับ 2.47% ในขณะที่ผลการทำนายของ NOx (**รูปที่ 6.3c**) แบบจำลองมี R^2 และ MAPE(%) เท่ากับ 0.998 และ 1.52%

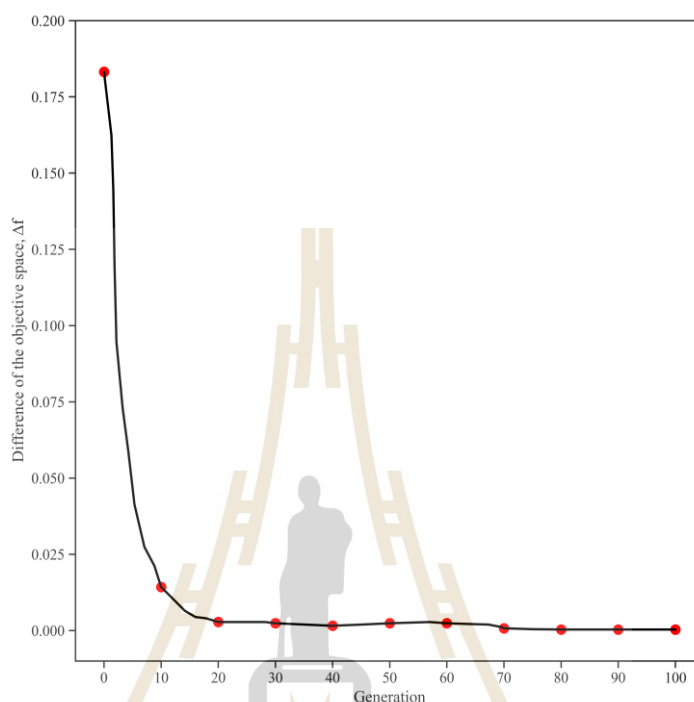


รูปที่ 6.3 ผลการทำนายตัวแปรเอาต์พุตมลพิษในเครื่องยนต์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GRNNs เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

6.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของน้ำมันและเครื่องยนต์ต่อประสิทธิภาพและการปล่อยมลพิษ

การลู่เข้าสู่คำตอบการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้อัลกอริทึม RVEA ในกรณีการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์โดยใช้โมเดล GRNNs ในการหาฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ซึ่งได้รับการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงาน [Blank et al, 2020] ในรูปที่ 6.4 ในการวิเคราะห์การลู่เข้าสู่คำตอบของอัลกอริทึม RVEA พบว่ากระบวนการหาค่าที่เหมาะสมจะ

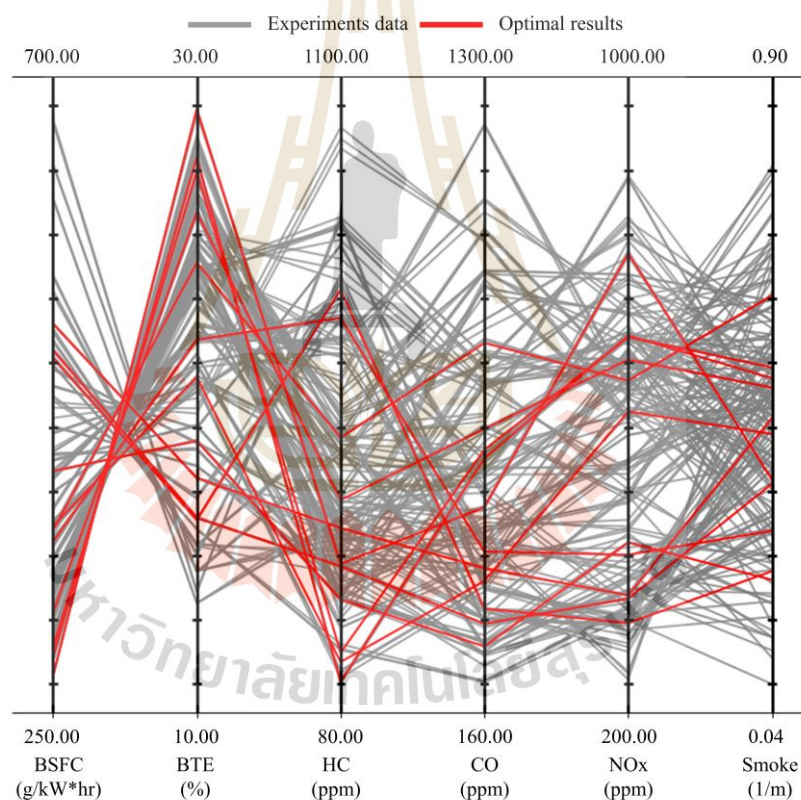
เริ่มลู่เข้าคำตอบในรุ่นที่ประมาณ 20 และคำตอบลู่เข้าสภาวะคงตัวหรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดจนรุ่นสุดท้าย



รูปที่ 6.4 จำนวนเจนเนอเรชันต่อการลู่เข้าของคำตอบของ RVEA algorithm

รูปที่ 6.5 แสดงผลลัพธ์สมรรถนะเครื่องยนต์ที่เหมาะสมที่สุดและการปล่อยมลพิษที่เกิดจากการหาค่าที่เหมาะสมของแบบจำลอง RVEA โดยคำตอบที่ได้มาจะถูกพล็อตเป็นแผนภาพพิกัดคู่ขนาน (Parallel Coordinate Plot, PCP) ในกรณีของการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ที่มีจำนวนวัตถุประสงค์ไม่เกิน 3 วัตถุประสงค์ โดยทั่วไปผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจะแสดงเป็นเส้นขอบเขตแดนพาเรโตซึ่งระบุขอบเขตของผลลัพธ์ที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนวัตถุประสงค์เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ขอบเขตนี้ก็จะซับซ้อนและยากต่อการตีความมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้วิธีการพล็อตแบบ PCP ซึ่งในการศึกษานี้ผลลัพธ์การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะแสดงไว้ใน PCP ว่าคำตอบอยู่ภายในกลุ่มหรือระหว่างขอบบนและขอบล่างของผลการทดลอง ซึ่งคำตอบอาจไม่เหมาะสมที่สุดเมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษแต่ละรายการแยกกัน เนื่องจากการหาค่าที่เหมาะสมระหว่างสมรรถนะของเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษไอเสียมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกัน (สมรรถนะเครื่องยนต์สูงอาจจะมีการปล่อยมลพิษที่สูงเนื่องจากฉีดยาน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น)

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจะถูกพล็อตแสดงเป็นผลลัพธ์ใน PCP ซึ่งแสดงไว้ดัง ตารางที่ 6.1 คำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของสัดส่วนน้ำมัน BHD(%) ส่วนใหญ่จะจัดกลุ่มในช่วง 90% ขึ้นไป และสำหรับ RPM ช่วงของค่าที่เหมาะสมที่สุดจะใกล้เคียงกับค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบมาก (อยู่ในช่วง 2000, 2500 และ 3000) ในขณะที่โหลด(%) ช่วงของค่าที่เหมาะสม ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงโหลดต่ำและใกล้เคียงกับโหลดสูงของค่าในการทดสอบ (25% และ 75%) เนื่องจากลักษณะของการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงมีจุดที่แตกต่างกันหลายจุด ดังนั้น เมื่อใช้งาน ผู้ใช้สามารถเลือกจุดที่เหมาะสมเฉพาะเจาะจงได้ตามเกณฑ์ที่สนใจ เช่น พิจารณาตามสมรรถนะของเครื่องยนต์หรือตามการปล่อยมลพิษ หรือตามการประเมินผลโดยรวม เป็นต้น



รูปที่ 6.5 Parallel Coordinates Plot ของอัลกอริทึม RVEA Objective Optimization

ตารางที่ 6.1 ผลคำตอบของ RVEA Many-Objective Optimization

Optimization Result										
Index	BHD	Biodiesel	RPM	Load	BSFC	BTE	HC	CO	NOx	Smoke
17	27	73	2504	82	369.67	24.58	514.70	832.38	619.88	0.62
0	15	85	2516	37	530.52	17.13	355.33	388.67	322.83	0.44
22	77	23	2989	36	504.09	15.68	775.67	308.67	284.37	0.21
20	63	37	2511	82	305.45	26.31	404.83	663.34	648.82	0.48
19	58	42	2492	27	510.05	15.75	288.00	279.00	318.40	0.34
21	76	24	2991	56	360.81	21.91	725.96	421.38	378.88	0.27
24	95	5	2014	64	278.20	27.71	135.37	622.01	680.04	0.51
23	95	5	2002	38	373.03	20.62	118.96	363.42	577.08	0.41
28	99	1	2018	63	271.33	28.22	83.33	605.00	681.97	0.49
27	99	1	2502	76	256.16	29.89	291.97	508.65	795.74	0.34
25	98	2	2511	37	415.83	18.41	229.23	234.33	396.10	0.20



ตารางที่ 6.2 การทำ Normalize เพื่อหาคะแนนรวมที่ดีที่สุด

Normalize Result							
Index	BSFC	BTE	HC	CO	NOx	Smoke	Sum Score
0	0.000	0.102	0.607	0.742	0.925	0.431	2.806
17	0.586	0.626	0.377	0.000	0.344	0.000	1.933
19	0.075	0.005	0.704	0.925	0.933	0.662	3.304
20	0.820	0.748	0.536	0.283	0.287	0.324	2.999
21	0.619	0.438	0.072	0.687	0.815	0.827	3.459
22	0.096	0.000	0.000	0.876	1.000	0.970	2.942
23	0.574	0.347	0.949	0.784	0.428	0.486	3.568
24	0.920	0.847	0.925	0.352	0.226	0.252	3.522
25	0.418	0.192	0.789	1.000	0.782	1.000	4.181
27	1.000	1.000	0.699	0.541	0.000	0.649	3.889
28	0.945	0.883	1.000	0.380	0.222	0.291	3.721

ตารางที่ 6.3 การทำ Normalize เพื่อหาคะแนนรวมที่ดีที่สุดในแต่ละมุมของ Performance, Emission และ NOx-Smoke

Normalize Result			
Index	Performance	Emission	NOx-smoke
0	0.102	2.704	1.355
17	1.213	0.721	0.344
19	0.079	3.22	1.595
20	1.569	1.430	0.612
21	1.057	2.401	1.642
22	0.096	2.846	1.97
23	0.921	2.646	0.914
24	1.767	1.755	0.478
25	0.610	3.571	1.782
27	2.000	1.889	0.649
28	1.827	1.894	0.513

จาก ตารางที่ 6.1 ทำการ Normalize ค่า Parameter และจากนั้นทำการรวมคะแนนเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดจะพบว่า ค่าคะแนนที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ Index 25 ซึ่งมีค่า BHD (%) เท่ากับ 98% และใน ตารางที่ 6.3 เป็นการให้คะแนนในแต่ละมุมของ Performance, Emission และ NOx-Smoke จะพบว่า ในมุมมอง Performance Index ที่ 28 มีค่าดีที่สุด ในแง่ของการปล่อย Emission Index ที่ 25 ให้ค่าที่ดีที่สุด และในแง่ของ NOx-Smoke Index ที่ 22 ให้ค่าที่ดีที่สุด

บทที่ 7

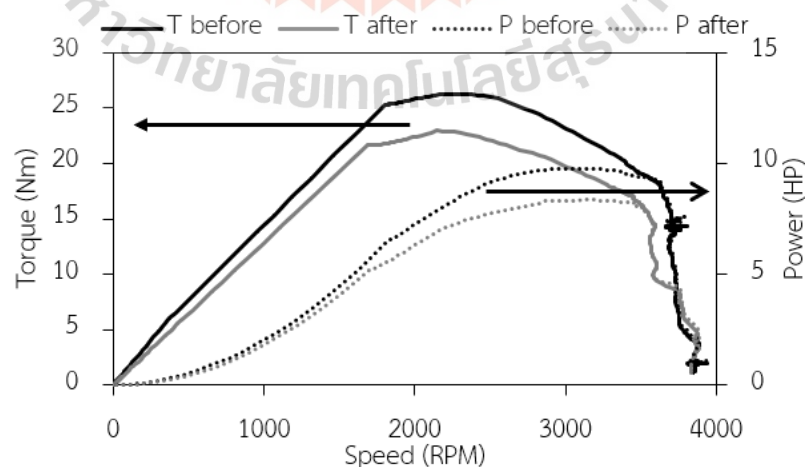
ผลการทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาว

7.1 ผลการทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาว

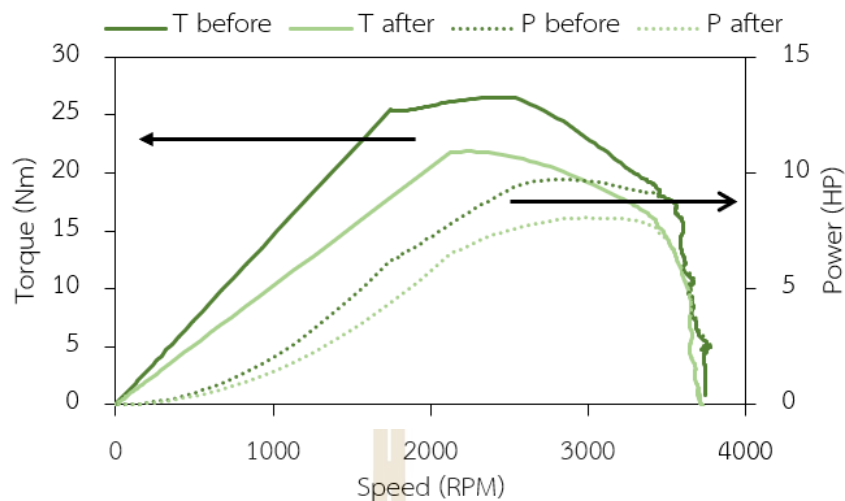
การทดสอบเครื่องยนต์ระยะยาว เป็นการศึกษาศักยภาพของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจวัดการสึกหรอก่อนและหลังการทดสอบโดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยอากาศ ทดสอบตามมาตรฐาน มอก.2618-2557 น้ำมันที่ใช้ทดสอบได้แก่ น้ำมันดีเซล, BHD, และ BHD90 (ประกอบไปด้วย BHD 90% ผสมกับไบโอดีเซล 10%) มีน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันอ้างอิง ซึ่งรายละเอียดการทดสอบมี 3 ส่วน ได้แก่ 1. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 2. การตรวจวัดการปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น 3. น้ำหนักและระยะที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นส่วนเครื่องยนต์

7.2 การทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ

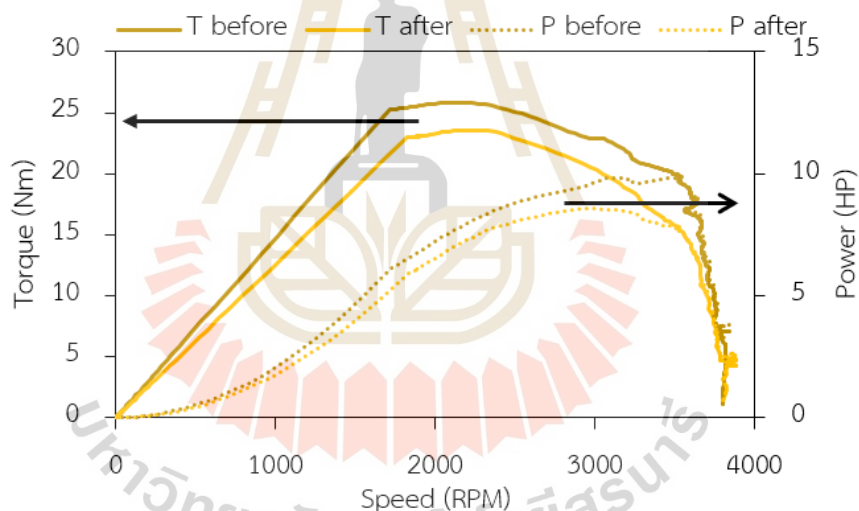
การเก็บค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ (แรงบิดและกำลัง) ก่อนเริ่มและหลังการทดสอบระยะยาว เป็นการตรวจสอบเครื่องยนต์เบื้องต้นว่าเครื่องยนต์หลังการทดสอบมีการทำงานที่ปกติเหมือนตอนก่อนเริ่มทดสอบหรือไม่ ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนไปหลังการใช้งานและการสึกหรอของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ล้วนแต่มีผลกระทบต่อสมรรถนะเครื่องยนต์ โดยรูปที่ 7.1 ถึง รูปที่ 7.3 แสดงสมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน ดีเซล BHD และ BHD90 ตามลำดับ



รูปที่ 7.1 สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลก่อนทดสอบและหลังทดสอบ



รูปที่ 7.2 สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD ก่อนทดสอบและหลังทดสอบ

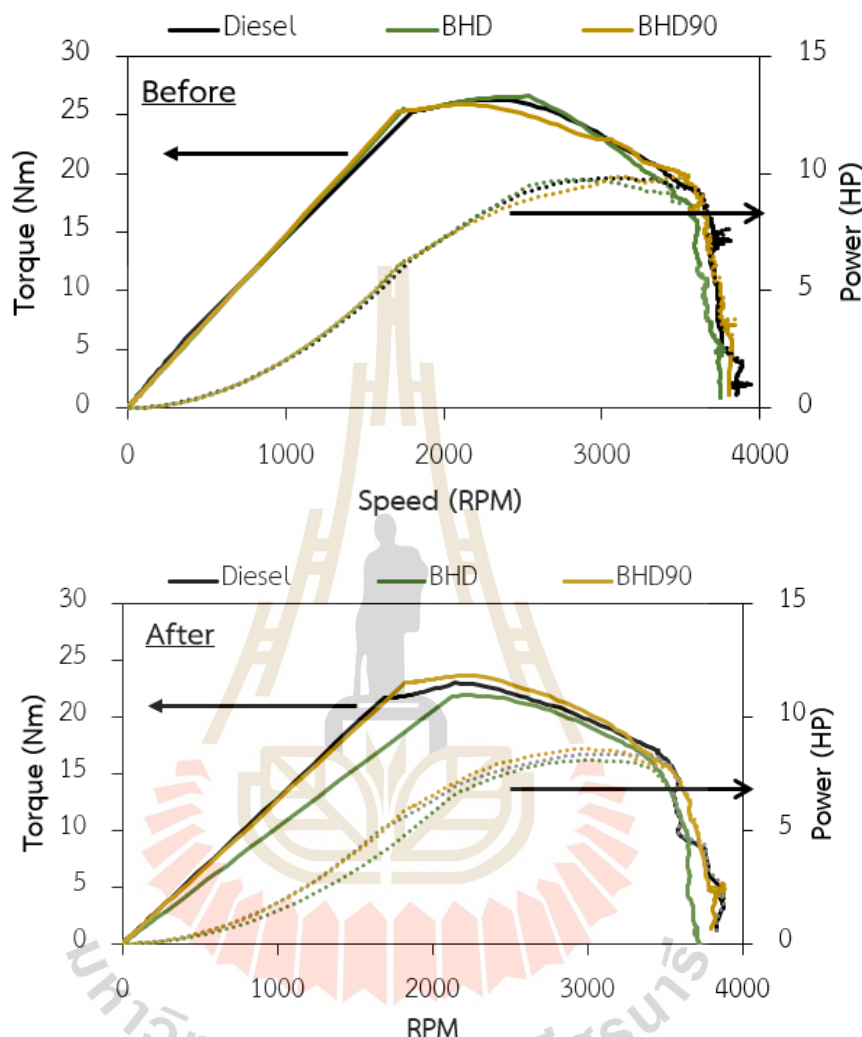


รูปที่ 7.3 สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD90 ก่อนทดสอบและหลังทดสอบ

รูปที่ 7.1 แสดงสมรรถนะเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลก่อนทดสอบและหลังทดสอบ พบว่าค่าแรงบิดสูงสุด และกำลังสูงสุดหลังทดสอบ มีค่าลดลงเท่ากับ 14.52% และ 12.64% ตามลำดับ

รูปที่ 7.2 แสดงกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD ก่อนทดสอบและหลังทดสอบพบว่าแรงบิดสูงสุดและกำลังสูงสุดหลังทดสอบมีค่าลดลงเท่ากับ 17.19% และ 17.7% ตามลำดับ

รูปที่ 7.3 แสดงกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD90 ก่อนทดสอบและหลังทดสอบพบว่าแรงบิดสูงสุดและกำลังสูงสุดหลังทดสอบมีค่าลดลงเท่ากับ 12.82% และ 8.74% ตามลำดับ



รูปที่ 7.4 เปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องยนต์ก่อนทดสอบและหลังทดสอบของน้ำมันแต่ละชนิด

ตารางที่ 7.1 กำลังอัดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

fuel	Compression Pressures (psi)		Standard (psi)
	Before	After	
Diesel	460	426	>330
BHD	453.33	415	
BHD90	460	430	

กำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล BHD และ BHD90 หลังทดสอบลดลงเกิดจากการสึกหรอของเครื่องยนต์ส่งผลให้กำลังอัดลดลงแสดงดัง ตารางที่ 7.1 รวมทั้งการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่องที่ลดลงเล็กน้อยและหากเปรียบเทียบกำลังและแรงบิดในแต่ละน้ำมันแสดงดัง รูปที่ 7.4 พบว่าก่อนเริ่มการทดสอบระยะยาวกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์มีค่าไม่แตกต่างกันมาก แต่หลังจากทดสอบครบระยะเวลา 200 ชั่วโมงกำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD จะมีการสึกหรอมากกว่าสังเกตได้จากค่ากำลังและแรงบิดของเครื่องยนต์ก่อนทดสอบและหลังทดสอบมีค่าลดลงมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมัน BHD90 และการเติมไบโอดีเซลเข้ากับน้ำมัน BHD มีส่วนช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์

7.3 การตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น

ในการทดสอบเครื่องยนต์ส่วนนี้ จะแบ่งการตรวจสอบน้ำมันเครื่องทั้งหมดเป็น 3 ส่วน คือ

7.3.1 การปนเปื้อนของอนุภาคโลหะในน้ำมันหล่อลื่น (Wear Element) เพื่อดูการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์

7.3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น (Oil condition) เพื่อตรวจดูอายุการใช้งานก่อนและหลังการทดสอบว่ามีการเสื่อมสภาพมากน้อยตามมาตรฐานหรือไม่

7.3.3 การเจือปนในน้ำมันหล่อลื่น (Contamination) เพื่อดูอัตราการเสื่อมของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งถ้ามีสารปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นมาก จะส่งผลต่อการเร่งการเสื่อมของน้ำมันหล่อลื่น โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบนี้ คือ PTT D3 Plus SAE 40

รายละเอียดการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นแต่ละหัวข้อเป็นไปดังต่อไปนี้

7.3.1 การปนเปื้อนของอนุภาคโลหะในน้ำมันหล่อลื่น (Wear Element)

การตรวจวัดการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะในน้ำมันหล่อลื่นมีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์สภาพการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งอนุภาคโลหะแต่ละชนิดจะมีที่มาที่แตกต่างกัน

การตรวจอนุภาคโลหะในส่วนนี้ จะแบ่งขนาดอนุภาคโลหะเป็น 2 ขนาด ได้แก่ อนุภาคโลหะขนาดเล็ก และอนุภาคโลหะขนาดใหญ่ โดยการปนเปื้อนโลหะขนาดเล็กหรือมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ $3\ \mu\text{m}$ จะทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือ Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) ในขณะที่การปนเปื้อนโลหะขนาดใหญ่ หรือมีขนาดขนาดประมาณ 5 ถึง $100\ \mu\text{m}$ จะทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือ Rotrode Filter Spectroscopy-Atomic Emission Spectrometer (RFS-AES) (Focus lab, 2020) ซึ่งการทราบอนุภาคโลหะขนาดต่าง ๆ สามารถช่วยในการบ่งบอกระดับการสึกหรอเบื้องต้นได้ ซึ่งผลการตรวจวัดมีดังนี้

7.3.1.1 การปนเปื้อนปริมาณอนุภาคโลหะขนาดเล็ก

โดยปกติแล้วการสึกหรอแบบปกติ (Normal Wear) จะมีขนาดอนุภาคโลหะเล็กหรือขนาดเล็ก โดยจะมีขนาดเล็กกว่า $5\ \mu\text{m}$ ซึ่งเกิดจากการเสียดสี ขัดถูกันของชิ้นส่วน อุปกรณ์เครื่องจักร ตารางที่ 7.2 แสดงผลการตรวจวัดปริมาณอนุภาคโลหะขนาดเล็กกว่า $3\ \mu\text{m}$ ในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันทั้งสามชนิดพบว่าในช่วง 20 (Run-In) ปริมาณเหล็ก (Iron) ในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันทั้งสามชนิดมีค่าสูงกว่าช่วง 120 และ 220 เนื่องจากในช่วงแรกมีการ Overhauls เครื่องยนต์อาจทำให้มีปริมาณเหล็กที่ตกค้างจากการไปพิตเครื่องยนต์ที่ล้างออกไม่หมด และในช่วงแรกเครื่องยนต์จะมี Clearance ที่แน่นส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่สูงแต่เมื่อทดสอบครบ 20 ชั่วโมง (Run-In) ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องทำให้ปริมาณเศษโลหะมีค่าลดลง

ตารางที่ 7.2 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กหลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง (Run-In) ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด

ชนิดโลหะ ปนเปื้อน อนุภาคเล็ก (ICP-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 20 ชั่วโมง (Run-In)			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring (PPM)
Iron	PPM	0	25.1	56.7	63.1	>200
Chromium	PPM	0	3.1	2.4	3.4	>15
Lead	PPM	0	0.7	1.3	1.5	>50
Copper	PPM	0	6.6	8.8	11	>25
Tin	PPM	0	0	0	0	>25

หมายเหตุ * วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D8184

ตารางที่ 7.3 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กหลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด

ชนิดโลหะปนเปื้อน อนุภาคเล็ก (ICP-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 100 ชั่วโมง			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring (PPM)
Iron	PPM	0	71.5	72	42.4	>200
Chromium	PPM	0	2.9	2.6	1.9	>15
Lead	PPM	0	0.4	0.9	0.2	>50
Copper	PPM	0	5.5	5	3.5	>25
Tin	PPM	0	0	0	0	>25

หมายเหตุ * วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D8184

ตารางที่ 7.4 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดเล็กหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด

ชนิดโลหะปนเปื้อน อนุภาคเล็ก (ICP-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 200 ชั่วโมง			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring (PPM)
Iron	PPM	0	159.7	272.8	100.7	>200
Chromium	PPM	0	3.9	5.2	3.8	>15
Lead	PPM	0	0.8	0.9	0.6	>50
Copper	PPM	0	7	7.1	6.4	>25
Tin	PPM	0	0	0	0	>25

หมายเหตุ * วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D8184

ในช่วงแรกของการเริ่มทดสอบระยะยาว จะเป็นการ Run-In เครื่องยนต์เนื่องจากมีการ Overhaul เพื่อให้ clearance ในชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์เข้าที่ ตารางที่ 7.2 แสดงอนุภาคโลหะชนิดต่าง ๆ หลังการทดสอบเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง (Run-In) พบว่าค่าปริมาณโลหะขนาดเล็กชนิดต่าง ๆ มีปริมาณที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์

เมื่อพิจารณาตารางที่ 7.3 พบว่า ปริมาณอนุภาคโลหะชั่วโมงที่ 100 ในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันชนิดต่าง ๆ พบว่ามีปริมาณโลหะในน้ำมันเครื่องเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมโดยเฉพาะปริมาณเหล็กขนาดเล็กเพิ่มขึ้นอย่างเห็น ได้ชัดในทุก ๆ น้ำมัน ถึงแม้ปริมาณเหล็กจะเพิ่มขึ้นแต่ยังมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้จึงยังไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์

เมื่อพิจารณาตารางที่ 7.4 พบว่า ปริมาณอนุภาคโลหะช่วงโมเมนต์ 200 ในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันชนิดต่าง ๆ พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีปริมาณอนุภาคเหล็กขนาดเล็กเกินเกณฑ์มาตรฐานเท่ากับ 36.4% ส่วนเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD90 และน้ำมันดีเซลยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนปริมาณโลหะอื่น ๆ ในเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดยังคงมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะขนาดเล็ก ($<3 \mu\text{m}$) ที่สูงอาจยังไม่สามารถกล่าวได้ว่าเครื่องยนต์มีการสึกหรออย่างรุนแรงต้องพิจารณาร่วมกับการปนเปื้อนอนุภาคโลหะขนาดใหญ่ ($5-100 \mu\text{m}$) ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

7.3.1.2 การปนเปื้อนปริมาณอนุภาคโลหะขนาดใหญ่

การสึกหรอแบบผิดปกติ (Abnormal Wear) อาจเกิดจากเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระโหลดสูงหรือทำงานที่ความเร็วรอบสูงจึงทำให้มีอนุภาคเศษโลหะขนาดเล็กและขนาดหยาบรวมกันโดยการปนเปื้อนอนุภาคโลหะขนาดใหญ่ที่มีขนาด $5-100 \mu\text{m}$ ซึ่งหากตรวจพบว่ามีปริมาณที่สูงอาจบ่งบอกได้ว่าเครื่องยนต์มีการสึกหรอแบบผิดปกติอันเนื่องมาจากกลไกการสึกหรอในรูปแบบต่าง ๆ จากตารางที่ 7.5 พบว่าในชั่วโมงที่ 20 (Run-In) ปริมาณอนุภาคโลหะขนาดใหญ่ในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันทั้ง 3 ชนิด ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 7.5 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่หลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง (Run-In) ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด

ชนิดเหล็กปนเปื้อน อนุภาคใหญ่ (RFS-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 20 ชั่วโมง (Run-In)			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring (PPM)
Iron	PPM	0	9.3	46.5	53.6	>200
Chromium	PPM	0	1.2	1.4	1.9	>15
Lead	PPM	0	0.5	0	0.3	>50
Copper	PPM	0	0.9	1.9	3.2	>25
Tin	PPM	0	0.1	0	1	>25

หมายเหตุ * วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D8184

ตารางที่ 7.6 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่หลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด

ชนิดเหล็กปนเปื้อน อนุภาคใหญ่ (RFS-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 100 ชั่วโมง			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring (PPM)
Iron	PPM	0	21.5	15.9	16.2	>200
Chromium	PPM	0	1.2	0.2	0	>15
Lead	PPM	0	0.3	0.4	0	>50
Copper	PPM	0	0.9	0.6	0	>25
Tin	PPM	0	0.6	1.2	0	>25

หมายเหตุ * วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D8184

ตารางที่ 7.7 อนุภาคเศษโลหะปนเปื้อนขนาดใหญ่หลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด

ชนิดเหล็กปนเปื้อน อนุภาคใหญ่ (RFS-AES)	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 200 ชั่วโมง			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring (PPM)
Iron	PPM	0	28.2	174.7	26.1	>200
Chromium	PPM	0	0.3	1.3	0.7	>15
Lead	PPM	0	0	0.2	0.8	>50
Copper	PPM	0	1	1	0.5	>25
Tin	PPM	0	0	0.7	0	>25

หมายเหตุ * วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D8184

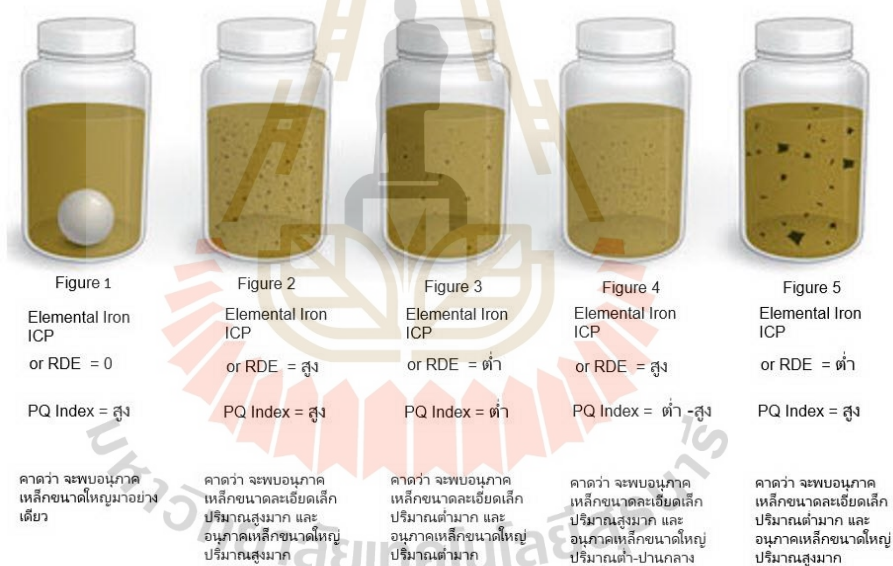
เมื่อพิจารณาตารางที่ 7.6 ปริมาณอนุภาคโลหะชั่วโมงที่ 100 ในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันชนิดต่าง ๆ พบว่ามีปริมาณโลหะขนาดใหญ่ในน้ำมันเครื่องที่ใช้ น้ำมันทั้ง 3 ชนิดยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์

เมื่อพิจารณาตารางที่ 7.7 ปริมาณอนุภาคโลหะชั่วโมงที่ 200 ในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันชนิดต่าง ๆ พบว่าปริมาณโลหะขนาดใหญ่ในน้ำมันเครื่องที่ใช้ น้ำมันทั้ง 3 ชนิดยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์ แต่เมื่อพิจารณาเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD จะพบว่ามีปริมาณเหล็กขนาดใหญ่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 174.7 PPM อีกทั้งมีปริมาณโลหะขนาดเล็กเท่ากับ 272.8 PPM ซึ่งเกิน

เกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งอาจบอกได้ว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD เกิดการสึกหรอแบบผิดปกติ เนื่องจาก การหล่อลื่นที่ไม่ดีของน้ำมัน BHD มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์

7.3.1.3 PQ Index ดัชนีอนุภาคเหล็กรวม

การปนเปื้อนอนุภาคเหล็กในน้ำมันหล่อลื่นหากตรวจสอบด้วยวิธีการ ICP-AES และ RFS-AES (การวัดการปนเปื้อนอนุภาคเหล็กขนาดเล็กและการวัดการปนเปื้อนอนุภาคเหล็กขนาดใหญ่) เพียงสองวิธีนี้ยังไม่สามารถระบุการสึกหรอแบบรุนแรงในเครื่องยนต์ได้ การใช้วิธีการวัด ปริมาณรวมของอนุภาคเหล็ก (Particle Quantifier Index, PQ Index) ควบคู่กันจะสามารถบ่งบอก ว่าเครื่องยนต์มีการสึกหรอรุนแรงหรือไม่ ช่วงการวัดของวิธีการ PQ Index สามารถวัดขนาดอนุภาค โดยรวมของเหล็กได้ตั้งแต่ 2-1,000 μm ซึ่งวิธีการวัดค่า PQ Index จะใช้สนามแม่เหล็กโดยเครื่องมือ วัดจะตอบสนองเฉพาะวัสดุที่มีสมบัติเป็น Ferromagnetic มาตรฐาน ASTM D8184 โดยวิธีการ ประเมินจะต้องดูปริมาณอนุภาคเหล็กขนาดเล็กและขนาดใหญ่ร่วมกันแสดงดัง รูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 การตรวจดูค่า PQ Index ควบคู่กับวิธีการ ICP หรือ RDE [Focus Lab, 2015]

ตารางที่ 7.8 ค่า PQ Index และค่าอนุภาคเหล็กขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแต่ละชนิด

ปริมาณโลหะ โดยรวม	Fuel	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่อง (hr)			
			20 (Run-In)	100	200	Waring (PPM)
PQ Index	Diesel	0	44	14	50	>20
	BHD	0	128	53	55	
	BHD90	0	64	14	19	
อนุภาคเหล็ก ขนาดเล็ก (ICP-AES)	Diesel	0	25.1	71.5	159.7	>200
	BHD	0	56.7	72	272.8	
	BHD90	0	63.1	42.4	100.7	
อนุภาคเหล็ก ขนาดใหญ่ (RFS-AES)	Diesel	0	9.3	21.5	28.2	>200
	BHD	0	46.5	15.9	174.7	
	BHD90	0	53.6	16.2	26.1	
ICP+RFS	Diesel	0	34.4	93	187.9	N/A
	BHD	0	103.2	87.9	447.5	
	BHD90	0	116.7	58.6	126.8	

จากตาราง 7.8 แสดงค่า PQ Index ในน้ำมันเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแต่ละชนิดทดสอบพบว่าที่ชั่วโมงที่ 20 (Run-In) ค่า PQ Index ของแต่ละน้ำมันมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานแต่ค่า ICP และ RFS ยังอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานซึ่งเข้าเกณฑ์ที่ 5 จาก รูปที่ 7.5 อาจหมายความว่า จะพบอนุภาคเหล็กขนาดเล็กกว่า 100 μm ในปริมาณที่น้อยมาก แต่จะพบอนุภาคเหล็กขนาดใหญ่ตั้งแต่ขนาด 100-1000 μm ปริมาณที่สูงมาก ซึ่งเป็นการสึกหรอผิดปกติ แต่เนื่องจากชั่วโมงที่ 20 (Run-In) เป็นช่วง Run-In เครื่องยนต์ อาจจะมีพบปริมาณเศษเหล็กขนาดใหญ่ได้จากการ Overhaul เครื่องยนต์ หรือ ชิ้นส่วนพวกแหวนลูกสูบและปลอกสูบ Clearance ยังไม่ได้จึงทำให้เกิดการสึกหรอสูง

หลังจากสตาร์ทเครื่องครบ 20 ชั่วโมง (Run-In) จะทำการเปลี่ยนน้ำมันเครื่องใหม่และสตาร์ทเครื่องยนต์ต่อเนื่อง เมื่อสตาร์ทเครื่องยนต์ครบ 100 ชั่วโมงจะพบว่าค่า PQ Index ของทั้ง 3 เชื้อเพลิงลดลงโดยเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและ BHD90 มีค่า PQ Index ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน หมายถึงพบปริมาณเหล็กขนาดใหญ่ในเกณฑ์ที่ต่ำ และค่า ICP และ RFS ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งเข้าเกณฑ์ที่ 3 จาก รูปที่ 7.5 หมายความว่า จะพบปริมาณเหล็กที่เล็กกว่า 100 μm และเหล็กขนาด

ช่วงขนาด 100-1000 μm ในปริมาณที่ต่ำ ซึ่งเป็นการสึกหรอแบบปกติ แต่เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD พบว่ามีค่า PQ Index ที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานและค่า ICP และ RFS ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งเข้าเกณฑ์ที่ 5 จาก **รูปที่ 7.5** หมายความว่าพบอนุภาคหลักขนาดเล็กกว่า 100 μm ในปริมาณที่น้อยมาก แต่จะพบอนุภาคหลักขนาดใหญ่ตั้งแต่ขนาด 100-1000 μm ปริมาณที่สูงมาก ซึ่งเป็นการสึกหรอที่รุนแรง

เมื่อครบ 100 ชั่วโมงแล้วสตาร์ทเครื่องต่อเนื่องไปจนครบ 200 ชั่วโมงจะพบว่า เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD90 มีค่า PQ Index ที่ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานและปริมาณหลัก ICP และ RFS มีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานซึ่งเข้าเกณฑ์ที่ 3 จาก **รูปที่ 7.5** หมายความว่าพบปริมาณหลักขนาด 2-1000 μm ในปริมาณที่น้อยมีการสึกหรอแบบปกติ แต่เมื่อพิจารณาเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน Diesel และ BHD พบว่าค่า PQ Index เกินค่ามาตรฐาน แต่ค่า ICP และ RFS ของน้ำมัน BHD สูงมากกว่าน้ำมันดีเซล อาจจะบอกได้ว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล เข้าเกณฑ์ที่ 5 จาก **รูปที่ 7.5** จะพบอนุภาคหลักขนาดเล็กกว่า 100 μm ในปริมาณที่น้อยมาก แต่จะพบอนุภาคหลักขนาดใหญ่ตั้งแต่ขนาด 100-1000 μm ปริมาณที่สูงมากเป็นการสึกหรอแบบผิดปกติ และเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD เข้าเกณฑ์ที่ 2 จาก **รูปที่ 7.5** หมายความว่าพบอนุภาคหลักขนาดเล็กกว่า 100 μm ในปริมาณที่เยอะมาก และจะพบอนุภาคหลักขนาดใหญ่ตั้งแต่ขนาด 100-1000 μm ปริมาณที่สูงมาก

7.3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น (Oil Condition)

การตรวจสอบค่าสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังจากการใช้งานเป็นเวลา 200 ชั่วโมง ประกอบด้วย ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 °C การออกซิเดชัน ไนเตรชันและเบสเนัมเบอร์ ดังแสดงใน **ตารางที่ 7.9** ถึง **ตารางที่ 7.11** ซึ่งค่าคุณสมบัติเหล่านี้ บ่งบอกการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น

ตารางที่ 7.9 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง (Run-In) ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันผสม

สมบัติ	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 20 ชั่วโมง (Run-In)				
			Diesel	BHD	BHD90	Lower	Upper
Viscosity @100 °C	cSt	14.8	14.3	14.4	13.9	12.5	16.3
Oxidation	Abs	4	5.1	4.4	5.2	-	8.1
Nitration	Abs/cm	0.4	2.2	2.2	2.1	-	25
Base Number	mg KOH/g	7.2	5.7	6.1	10.2	2	-

ตารางที่ 7.10 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันผสม

สมบัติ	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 100 ชั่วโมง				
			Diesel	BHD	BHD90	Lower	Upper
Viscosity @100 °C	cSt	14.8	13.8	13.8	13.6	12.5	16.3
Oxidation	Abs	4	11.2	9.3	15.5	-	8.1
Nitration	Abs/cm	0.4	3.6	4.4	3.6	-	25
Base Number	mg KOH/g	7.2	9.3	9.9	9.3	2	-

ตารางที่ 7.11 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของน้ำมันดีเซลและน้ำมันผสม

สมบัติ	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 200 ชั่วโมง				
			Diesel	BHD	BHD90	Lower	Upper
Viscosity @100 °C	cSt	14.8	13.2	12.3	11.8	12.5	16.3
Oxidation	Abs	4	17.6	14	20	-	8.1
Nitration	Abs/cm	0.4	5.5	6.3	3.5	-	25
Base Number	mg KOH/g	7.2	8.4	8.2	6.9	2	-

จาก ตารางที่ 7.9 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง (Run-In) พบว่า ค่าคุณสมบัติทั้งหมดยังอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อทดสอบครบ 100 ชั่วโมงดัง ตารางที่ 7.10 พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดมีค่า Oxidation เกินเกณฑ์มาตรฐานซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งสอดคล้องกับคู่มือการใช้เครื่องยนต์ของบริษัทที่จะต้องให้เปลี่ยนน้ำมันเครื่องทุก ๆ 100 ชั่วโมง แต่ค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อทดสอบครบ 200 ชั่วโมงข้อมูลแสดงดัง ตารางที่ 7.11 จะพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันทั้ง 3 ชนิดมีค่า Oxidation ที่เกินเกณฑ์มาตรฐานอย่างมาก เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเลยช่วงเวลาเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง 100 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาค่าความหนืดจะพบว่าค่าความหนืดน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD และ BHD90 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

7.3.3 การเจือปนในน้ำมันหล่อลื่น (Contamination)

การเจือปนของสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่น มีผลอย่างมากในการเร่งความเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น การเจือปนสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น เช่น น้ำ เชื้อเพลิง เหม่า ฯลฯ โดยสิ่งเหล่านี้หากพบมากเกินไปในน้ำมันหล่อลื่น จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

หลังจากการทดสอบเป็นระยะเวลา 200 ชั่วโมงข้อมูลแสดงดังตารางที่ 7.12 ถึงตารางที่ 7.14 พบว่าค่าการเจือปนต่าง ๆ ในน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ยังอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานสิ่งเหล่านี้อาจบอกได้ว่าสภาพแวดล้อมการทดสอบมีฝุ่นน้อย กรองอากาศไม่สกปรกมากไปจึงสามารถกรองเศษฝุ่นก่อนที่จะเข้าเครื่องยนต์ได้หรือแม้กระทั่งตอนเก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่อง มีการเก็บอย่างถูกวิธีจึงไม่มีสิ่งเจือปนเข้าไปผสมในน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น

ตารางที่ 7.12 สิ่งเจือปนสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 20 ชั่วโมง (Run-In)

สิ่งเจือปน	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 20 ชั่วโมง (Run-In)			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring
Water	% (wt.)	0.08	0.064	0.063	0.068	>0.25
Fuel	% (wt.)	-	0.1	0.1	0.1	>5
Soot	% (wt.)	-	0.35	0.37	0.39	-
Vanadium	PPM	0	0	0	0	>6
Sodium	PPM	4	3	5	3	<30
Silicon*	PPM	13	20.6	17.8	14	-
Silicon**	PPM	13	15.3	10.5	3.7	>50

หมายเหตุ* อนุภาคนาขนาดเล็ก, **อนุภาคนาขนาดใหญ่

ตารางที่ 7.13 สิ่งเจือปนสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 100 ชั่วโมง

สิ่งเจือปน	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 100 ชั่วโมง			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring
Water	% (wt.)	0.08	0.072	0.062	0.065	>0.25
Fuel	% (wt.)	-	0.1	1.4	0.1	>5
Soot	% (wt.)	-	0.52	0.57	0.5	-
Vanadium	PPM	0	0	0	0	>6
Sodium	PPM	4	3	4	1	<30
Silicon*	PPM	13	19.3	15.3	7.4	-
Silicon**	PPM	13	7.7	5.2	0	>50

หมายเหตุ* อนุภาคนาโนเล็ก, **อนุภาคนาโนใหญ่

ตารางที่ 7.14 สิ่งเจือปนสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง

สิ่งเจือปน	หน่วย	PTT D3 Plus SAE 40 (Base oil)	ตัวอย่างน้ำมันเครื่องระยะเวลา 200 ชั่วโมง			
			Diesel	BHD	BHD90	Waring
Water	% (wt.)	0.08	0.077	0.067	0.069	>0.25
Fuel	% (wt.)	-	1.1	1.4	1.4	>5
Soot	% (wt.)	-	0.86	0.73	0.6	-
Vanadium	PPM	0	0	0	0	>6
Sodium	PPM	4	4	5	1	<30
Silicon*	PPM	13	21	16.7	8.1	-
Silicon**	PPM	13	6.6	0.4	0.4	>50

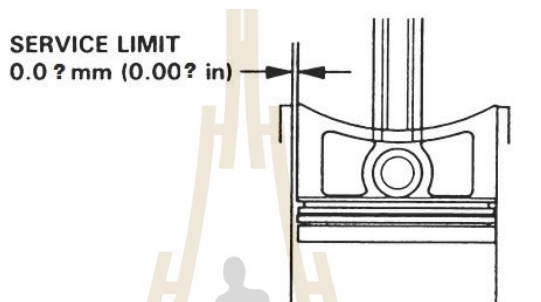
หมายเหตุ* อนุภาคนาโนเล็ก, **อนุภาคนาโนใหญ่

7.4 ผลการชั่งน้ำหนักและการวัดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์

ตารางที่ 7.15 แสดงผลต่างการวัดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันทั้ง 3 ชนิดพบว่า ชิ้นส่วนปลอกสูบ (Liner) หลังทดสอบของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล BHD และ BHD90 มีการสึกหรอเท่ากับ 0.0069, 0.0085, และ 0.0033 มิลลิเมตร ซึ่งมี

ค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน คือ 0.2 mm และสังเกตว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD เป็นเชื้อเพลิงมีการสึกหรอของชิ้นส่วน Liner มากที่สุด เมื่อพิจารณาพร้อมกับ Piston Clearance หรือก็คือระยะห่างระหว่างลูกสูบกับปลอกสูบแสดงดัง **รูปที่ 7.6** พบว่ามีความสอดคล้องกับขนาด Liner ที่เพิ่มขึ้นยิ่ง Piston Clearance กว้างก็บ่งบอกว่าชิ้นส่วน Liner และลูกสูบมีการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาชิ้นส่วน Piston Pin และ Piston พบว่าค่าชิ้นส่วนการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีการสึกหรอมากที่สุด และการใช้น้ำมัน BHD90 มีการสึกหรอน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาการสึกหรอของวาล์วไอดีและไอดีพบว่าไม่มีการสึกหรอในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 7.6 ระยะห่างระหว่างลูกสูบและปลอกสูบ หมายเหตุ จาก <https://www.Evolutionm.net/forums/evo-x-engine-turbo-drivetrain/728444-clearance-piston-cylinder.html>

ตารางที่ 7.15 ผลต่างการวัดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

Differences in Engine Parts Before and After Testing (mm)					
Component	Diesel (mm)	BHD (mm)	BHD90 (mm)	Standard (mm)	Limit (mm)
Liner	-0.00694	-0.0085	-0.00328	N/A	≥ 0.02
Piston Pin	0.00650	0.00717	0.00392	N/A	≥ 0.013
Piston	0.01933	0.02417	0.01417	N/A	≥ 0.265
Intake Valve	0	0	0	N/A	≥ 0.015
Exhaust Valve	0	0	0	N/A	≥ 0.015
Piston Clearance	-0.038	-0.076	-0.026	N/A	≥ 0.02

หมายเหตุ ค่าเป็นลบหมายถึงขนาดชิ้นส่วน After มีขนาดใหญ่กว่า Before

ค่าเป็นบวกหมายถึงขนาดชิ้นส่วน After มีขนาดเล็กกว่า Before

ตารางที่ 7.16 แสดงผลต่างการวัดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบของเชื้อเพลิง BHD และ BHD90 เทียบกับน้ำมัน Diesel พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีการสึกหรอมากกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล โดยชิ้นส่วน Liner มีการสึกหรอมากกว่า 22.4% และ Piston Clearance มีการสึกหรอมากกว่า 100% ในขณะที่เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD90 มีการสึกหรอของ Liner น้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเท่ากับ 52.8% และ Piston Clearance มีการสึกหรอน้อยกว่า 31.58% ส่วนการสึกหรอของ Piston Pin และ Piston ของน้ำมัน BHD และ BHD90 มีการสึกหรอมากกว่าน้ำมันดีเซล การสึกหรอของวาล์วไอดีและไอเสียก็มีความแตกต่างกันอาจจะบอกได้ว่าวาล์วไอดีและไอเสียไม่มีการสึกหรอ

ตารางที่ 7.16 ผลต่างการวัดชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล

ชิ้นส่วน	ผลต่างการวัดเทียบกับดีเซล (%)	
	BHD	BHD90
Liner	22.4	-52.8
Piston Pin	10.25	-39.74
Piston	26.72	-26.42
Valve ID	ไม่มีความแตกต่าง	
Valve EX		
Piston Clearance	100	-31.58

หมายเหตุ ค่าเป็นลบหมายถึงการสึกหรอน้อยกว่าน้ำมันดีเซล

ค่าเป็นบวกหมายถึงการสึกหรอมากกว่าน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 7.17 ผลต่างการใช้น้ำมันของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันแต่ละชนิด โดยยิ่งตัวเลขความแตกต่างของน้ำมันก่อนและหลังการทดสอบยิ่งมากยิ่งแสดงถึงการสึกหรอที่สูง **ตารางที่ 7.18** ผลต่างการใช้น้ำมันชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลพบว่า น้ำมัน BHD มี ชิ้นส่วน แหวน 1, แหวน 2, แหวน 3, ปลอก Fuel Pump, Piston Pin และ Piston สึกหรอมากกว่า น้ำมันดีเซลเท่ากับ 19.7%, 18.5%, 5.9%, 49.6%, 9.3% และ 7.9% เมื่อพิจารณาน้ำมัน BHD90 พบว่าการผสมไบโอดีเซล 10% สามารถช่วยลดการสึกหรอของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ลงได้ โดยมี

ชิ้นส่วน แหวน 1, แหวน 2, แหวน 3, ป्लอก Fuel Pump, Piston Pin และ Piston สึกหรอน้อยกว่า น้ำมันดีเซลเท่ากับ 15.1%, 46.3%, 14.0%, -38.8%, 13.0% และ 13.6%

ตารางที่ 7.17 ผลต่างการชั่งน้ำหนักของชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันแต่ละชนิด

Differences in Engine Weight Before and After Testing (g)			
Component	Diesel (g)	BHD (g)	BHD90 (g)
แหวน 1	-0.0290	-0.0347	-0.0246
แหวน 2	-0.0275	-0.0326	-0.0148
แหวน 3	-0.0246	-0.0261	-0.0211
ปลอก Fuel Pump	-0.0121	-0.0181	-0.0074
Piston Pin	-0.0054	-0.0059	-0.0047
Piston	-0.88	-0.95	-0.76

ตารางที่ 7.18 ผลต่างการชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนเครื่องยนต์ก่อนและหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล

ชิ้นส่วน	ผลต่างน้ำหนักเทียบกับดีเซล (%)	
	BHD (%)	BHD90 (%)
แหวน 1	19.65	-15.06
แหวน 2	18.33	-46.28
แหวน 3	5.89	-14.02
ปลอก fuel pump	49.59	-38.84
Piston pin	9.26	-12.96
Piston	7.95	-13.64

หมายเหตุ ค่าเป็นลบหมายถึงการสึกหรอน้อยกว่าน้ำมันดีเซล

ค่าเป็นบวกหมายถึงการสึกหรอมากกว่าน้ำมันดีเซล

7.5 ภาพถ่ายลูกสูบ

จาก ตารางที่ 7.19 เปรียบเทียบภาพถ่ายลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันชนิดต่าง ๆ พบว่า คราบเขม่าลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีปริมาณเขม่าเกาะบริเวณขอบลูกสูบน้อยกว่าน้ำมัน ดีเซล และ BHD90 เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำมัน BHD มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรงส่งผลต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ หากพิจารณาบริเวณด้านข้างของลูกสูบพบว่าถ้ามองด้วยตาเปล่าอาจไม่เห็นความแตกต่างว่าลูกสูบอันไหนมีการสึกหรอมากกว่าแต่พิจารณา ตารางที่ 7.17 จะพบว่าลูกสูบที่ใช้ น้ำมัน BHD จะมีการสึกหรอมากกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากการรั่วไหลของ Blowby-Gas ผ่านร่องแหวน ลูกสูบส่งผลต่อการปนเปื้อนของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นทำให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพและมีคุณสมบัติ การหล่อลื่นที่ลดลง

7.6 ภาพถ่ายฝาสูบ

จาก ตารางที่ 7.20 แสดงภาพถ่ายฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันชนิดต่าง ๆ พบว่าหลัง ทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง ฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมีเขม่าหนาตามบริเวณรูหัวฉีดมี และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายฝาสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD พบว่ามีคราบเขม่าน้อยกว่าน้ำมัน ดีเซลและ BHD90 อย่างชัดเจน

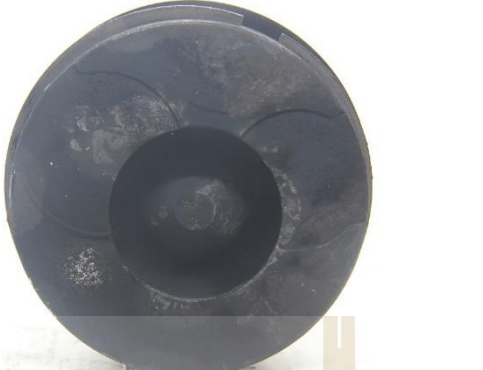
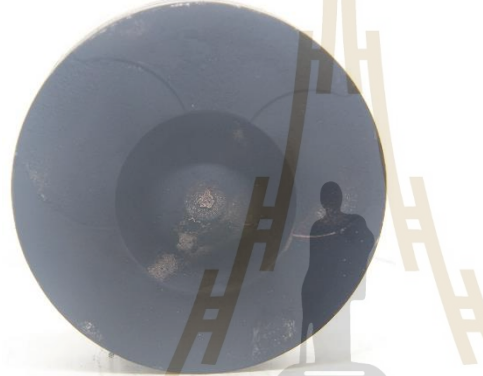
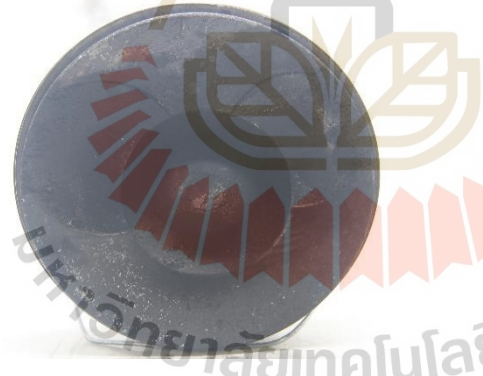
7.7 ภาพถ่ายหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง

จาก ตารางที่ 7.21 ภาพถ่ายหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมัน ผสมหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมงพบว่าหัวฉีดน้ำมัน BHD ลักษณะเขม่าที่เกาะเป็นแบบ ละเอียดไม่จับตัวกันเป็นก้อนเหมือนกับน้ำมันดีเซล

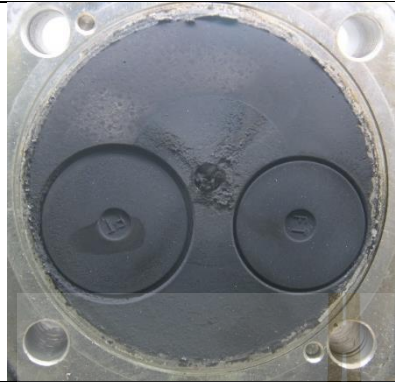
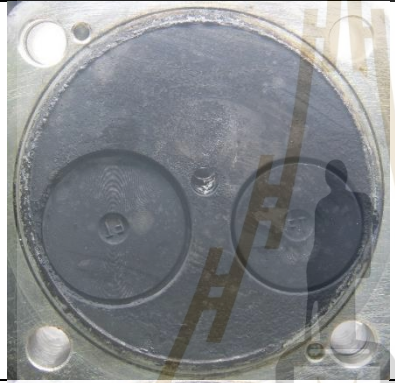
7.8 ภาพถ่ายวาล์วไอดีและวาล์วไอเสีย

จาก ตารางที่ 7.22 ภาพถ่ายวาล์วไอดีของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันผสมหลังการ ทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD พบปริมาณเขม่าน้อยกว่าน้ำมันผสม

ตารางที่ 7.19 ภาพถ่ายลูกสูบหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง

Fuel	Piston	
Diesel		
BHD		
BHD90		

ตารางที่ 7.20 ภาพถ่ายฝาสูบหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง

Fuel	Cylinder Head
Diesel	
BHD	
BHD90	

ตารางที่ 7.21 ภาพถ่ายหัวฉีดหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง

Fuel	Injector	
Diesel		
BHD		
BHD90		

ตารางที่ 7.22 ภาพถ่ายวาล์วไอดีและไอเสียหลังการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมง

Fuel	Intake Valve	Exhaust Valve
Diesel		
BHD		
BHD90		

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลงานวิจัย

การผสมน้ำมันไบโอดีเซลสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการหล่อลื่นที่สูญเสียไปของน้ำมัน BHD การเติมไบโอดีเซลเพียง 5% ก็เพียงพอต่อการลดค่าเสียดผ่านศูนย์กลางการสึกหรอของน้ำมัน BHD ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานและการเติมไบโอดีเซลมากกว่า 10% ขึ้นไปค่าเสียดผ่านศูนย์กลางการสึกหรอไม่มีความแตกต่างกัน

สมรรถนะของเครื่องยนต์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาไหม้ซึ่งส่งผลต่อ BSFC และ BTE การเพิ่มโหลดและความเร็วเครื่องยนต์ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น แต่ระดับที่สูงเกินไปสามารถลดสมรรถนะเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ น้ำมัน BHD มีประสิทธิภาพดีกว่าน้ำมันดีเซลโดยมี BSFC ต่ำกว่าและ BTE สูงกว่าเนื่องจากมีดัชนีซีเทนที่สูงกว่าและค่าความร้อนเชื้อเพลิงมากกว่า อย่างไรก็ตามการผสมไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD ทำให้ BSFC เพิ่มขึ้นและ BTE ลดลงเนื่องจากมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำกว่าและพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่แย่ลง

โหลดเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นทำให้ความดันในกระบอกสูบ (ICP) และอัตราการปล่อยความร้อน (HRR) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการฉีดน้ำมันเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาการทำงานของเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการปล่อยพลังงานมากขึ้นส่งผลต่ออุณหภูมิในห้องเผาไหม้พฤติกรรมนี้มีผลในทุก ๆ น้ำมัน เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ Ignition Delay ยาวขึ้นมีผลในทุก ๆ โหลด นอกจากนี้ความเร็วเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นทำให้การ Start of Combustion ล่าช้าเนื่องจากน้ำมันมีเวลาน้อยลงในการผสมกับอากาศและมีเวลาการเผาไหม้สั้นลง น้ำมัน BHD และน้ำมันผสมแสดง Ignition Delay ที่สั้นกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากการผสมน้ำมัน อากาศ และการกระจายตัวของน้ำมันที่ดีกว่า การมีไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD ลดทั้ง ICP และ HRR เนื่องจากลักษณะเฉพาะของไบโอดีเซล ส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของน้ำมันและการปลดปล่อยความร้อน

การเปลี่ยนแปลงโหลดเครื่องยนต์ ความเร็ว และอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD ต่อการปล่อยมลพิษแสดงให้เห็นแนวโน้มที่น่าสังเกต โหลดเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้การปล่อย NO_x และ HC เพิ่มขึ้น ในขณะที่การปล่อย CO เพิ่มขึ้นเนื่องจากส่วนผสมของอากาศและน้ำมันที่เข้มข้นขึ้นแต่ลดลงเมื่อความเร็วเครื่องยนต์สูงขึ้นเนื่องจากประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีขึ้น การปล่อยเขม่าควันดำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นแต่ลดลงเมื่อความเร็วสูงขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนของการเผาไหม้ที่ดีขึ้น นอกจากนี้ BHD มีแนวโน้มแสดงการปล่อยมลพิษที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากมี

ปริมาณอะโรมาติกที่ลดลง ในทางกลับกัน การเพิ่มไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD มักจะเพิ่มการปล่อยมลพิษเนื่องจากการกระจายตัวของน้ำมันที่แย่งและอัตราส่วน H/C ที่ต่ำลง ซึ่งทำให้การปล่อย HC CO และเขม่าควันดำสูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ในขณะที่ระยะเวลาการเผาไหม้สั้นลงส่งผลให้การปล่อย NOx ต่ำลง

ความแม่นยำในการทำนายตัวแปรสมรรถนะเครื่องยนต์ (BTE และ BSFC) ของแบบจำลอง GRNNs โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.996 และ 0.645% ในกรณีของความแม่นยำในการทำนายการปล่อยมลพิษ (HC, CO, Nox, และ Smoke) มีค่าเฉลี่ย R^2 และ MAPE (%) เท่ากับ 0.981 และ 4.45% ผลการทำนายของแบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง GRNNs สามารถทำนายพฤติกรรมได้อย่างแม่นยำระหว่างกลุ่มตัวแปรอินพุต (สัดส่วนน้ำมัน BHD, โหลด, และความเร็วรอบเครื่องยนต์) และกลุ่มตัวแปรเอาต์พุต (พารามิเตอร์สมรรถนะของเครื่องยนต์และพารามิเตอร์การปล่อยมลพิษ)

ผลการทำนายค่าอินพุตที่ทำให้เอาต์พุตด้านสมรรถนะเครื่องยนต์และการปล่อยมลพิษไอเสียมีค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์โดยใช้อัลกอริทึม RVEA พบว่า ค่าของอัตราส่วนน้ำมัน Biodiesel ผสมใน BHD ที่ทำให้ได้ค่าเอาต์พุตที่เหมาะสมที่สุด มีอัตราส่วนผสมไม่เกิน 10% ความเร็วเครื่องยนต์ (RPM) มีการกระจายตัวใกล้เคียงกับระดับในการทดลอง (2,000 RPM, 2,500 RPM, และ 3,000 RPM) และโหลดเครื่องยนต์ (Load (%)) อยู่ในช่วงโหลดต่ำกับโหลดสูง (25% และ 75%)

หลังจากการทดสอบเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันชนิดต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 200 ชั่วโมง พบว่าแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ลดลงในทุกน้ำมัน โดยเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมีค่าแรงบิดลดลง 14.52% และกำลังลดลง 12.64% ส่วนน้ำมัน BHD ทำให้แรงบิดลดลง 17.19% และกำลังลดลง 17.7% ในขณะที่เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD90 ลดลงน้อยที่สุด โดยแรงบิดลดลง 12.82% และกำลังลดลง 8.74% จากข้อมูลนี้ สรุปได้ว่าน้ำมัน BHD ทำให้เครื่องยนต์สึกหรอมากที่สุด และน้ำมัน BHD90 ทำให้สึกหรอน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

กำลังอัดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันชนิดต่าง ๆ หลังจากทดสอบเป็นเวลา 200 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลลดลงจาก 460 psi เป็น 426 psi ส่วนน้ำมัน BHD ลดลงจาก 453.33 psi เป็น 415 psi และ BHD90 ลดลงจาก 460 psi เป็น 430 psi กำลังอัดของเครื่องยนต์ที่ลดลงนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการสึกหรอภายในเครื่องยนต์ ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนต่าง ๆ

การตรวจสอบการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะในน้ำมันหล่อลื่นหลังจากการทดสอบเป็นระยะเวลา 200 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD มีปริมาณเหล็กขนาดเล็กเกินมาตรฐาน โดยมีค่า 272.8 ppm ส่วนน้ำมันดีเซลมีค่าอยู่ที่ 159.7 ppm และ BHD90 อยู่ที่ 100.7 ppm นอกจากนี้ ยังพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD มีอนุภาคเหล็กขนาดใหญ่ถึง 174.7 ppm ซึ่งบ่งชี้ว่าเกิดการสึกหรอแบบผิดปกติในเครื่องยนต์

คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีค่าความหนืดต่ำที่สุด โดยมีค่า 12.3 cSt ที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน ดีเซลที่มีค่า 13.2 cSt และ BHD90 ที่มีค่า 11.8 cSt นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD ยังมีค่าการออกซิเดชันสูงที่สุดที่ 27.3 Abs ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ มากที่สุด หลังจากการทดสอบ 200 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ น้ำมัน BHD มีการปนเปื้อน เชื้อเพลิงมากที่สุด โดยมีปริมาณเชื้อเพลิงเจือปนในน้ำมันหล่อลื่นถึง 1.4% ซึ่งเท่ากับน้ำมัน BHD90 ส่วนเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลมีการปนเปื้อนเชื้อเพลิงเพียง 1.1% นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนของ สิ่งสกปรกอยู่ในระดับที่ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานสำหรับทุกน้ำมันที่ทดสอบ

การทดสอบหลังจาก 200 ชั่วโมงพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีการสึกหรอของชิ้น ส่วนมากที่สุด โดยชิ้นส่วน Liner ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD สึกหรอมากถึง 0.0085 มม. ซึ่ง มากกว่าน้ำมันดีเซลที่สึกหรอ 0.0069 มม. และ BHD90 สึกหรอน้อยที่สุดที่ 0.0033 มม. นอกจากนี้ ยังพบว่า Piston Pin และ Piston ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีการสึกหรอมากกว่าน้ำมันดีเซล และ BHD90

จากภาพถ่ายลูกสูบหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีเขม่าจับ ตัวบริเวณขอบลูกสูบน้อยกว่าน้ำมันดีเซลและ BHD90 แสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยัง พบว่าลูกสูบของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD มีการสึกหรอมากที่สุด โดยพบคราบเขม่าที่เกาะบริเวณ ด้านข้างของร่องแหวนลูกสูบ ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของ Blowby-Gas

การทดสอบน้ำมันในเครื่องยนต์การเกษตร KAWAMA 186 F การผสมไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD จะลดสมรรถนะของเครื่องยนต์แต่จะช่วยเรื่องลดการปล่อยมลพิษ NOx ที่เป็นมลพิษหลักของ เครื่องยนต์ดีเซล ในการทดสอบระยะยาว 200 ชั่วโมงการเติมไบโอดีเซล 10% ใน BHD ช่วยลดการ สึกหรอของเครื่องยนต์แต่หากทดสอบระยะเวลานานกว่าและเพิ่มอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลในน้ำมัน BHD นี้มีโอกาสที่จะสึกหรอมากกว่าได้เนื่องจากไบโอดีเซลมีโอกาสทำให้น้ำมันเครื่องเสื่อมสภาพเร็ว การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้อัลกอริ ทึม RVEA สามารถทำนายค่าเอาต์พุตได้สอดคล้องกับการทดลองจริงซึ่งสามารถใช้วิธีการนี้เพื่อลด จำนวนการทดลองจริงได้

8.2 ข้อเสนอแนะ

8.2.1 ในการหาค่าที่เหมาะสมควรใส่ข้อจำกัด (Constraints) เพื่อลดขอบเขตของคำตอบให้แคบลงและสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยข้อจำกัดอาจอ้างอิงจากมาตรฐานการปล่อยมลพิษในเครื่องยนต์

8.2.2 การทำ Normalize ของคำตอบที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมของอัลกอริทึม RVEA ควรให้ลำดับความสำคัญของน้ำหนักคะแนนไม่เท่ากัน เช่น ตัวแปรการปล่อยมลพิษควรควรมีน้ำหนักคะแนนที่มากกว่าตัวแปรสมรรถนะเครื่องยนต์ ซึ่งแล้วแต่การพิจารณาว่าต้องการในแง่มุมใด

8.2.3 ในการทดสอบเครื่องยนต์ระยะสั้นและระยะยาวควรควบคุมแรงดันย้อนกลับของไอเสีย (Exhaust Back-Pressure) ให้เท่ากันทุกน้ำมันที่ใช้ทดสอบเนื่องจากมีผลต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์

8.2.4 ควรวัดแรงดันรางหัวฉีดเทียบกับองศาเพลาคือข้อเหวี่ยงเพื่อตรวจสอบการฉีดน้ำมันแต่ละชนิดว่ามีการฉีดที่องศาเพลาคือข้อเหวี่ยงที่เท่ากันหรือไม่

8.2.5 สามารถนำชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่เกิดการสึกหรอไปส่องกล้อง 3D Laser Microscope เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวความเสียหายในเชิงลึก



รายการอ้างอิง

- กรมธุรกิจพลังงาน. (2012). คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นและการทดสอบ. สืบค้น 20 มีนาคม 2565, จาก https://www.doeb.go.th/kmv2/knowledge/km_lub55.pdf
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2554). คู่มือองค์ความรู้เกี่ยวกับน้ำมันเครื่องเรื่องโครงการจัดการความรู้เกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่น. กระทรวงพลังงาน.
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2566). กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล. กระทรวงพลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2559). รายงานคุณภาพพลังงานของประเทศไทย ปี พ.ศ.2559. กระทรวงพลังงาน.
- ชัยยง ศิริพรมงคลชัย. (2558). เครื่องยนต์สันดาปภายใน. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์
- ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์. (2547). การสีกหรือในงานอุตสาหกรรม: ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ปราโมท พลพณะนาวิ. (2554). หลักการคำนวณปริมาณน้ำผ่านอาคารชลประทาน. สืบค้น 5 พฤษภาคม 2563, จาก www.hydro-2.com.
- พิชญ์ ปริญญาจารย์. (2546). ผลของการใช้น้ำมันปาล์มดีเซลในเครื่องยนต์ CI ขนาดเล็กที่ใช้ในการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2559). สถานการณ์พลังงานไทย ปี พ.ศ. 2559, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.eppo.go.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 17/04/2560
- สถาพร เชื้อเพลิง. (2544). การศึกษาเวลาการเปลี่ยนถ่ายของน้ำมันหล่อลื่นและไส้กรองในเครื่องยนต์ดีเซล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- สมภพ พัฒนอริยางกุล. (2562). ภาพรวมโครงสร้างนโยบายพลังงาน. กระทรวงพลังงาน
- สวัสด์ ภูมิสวัสด์. (2558). เอกสารประกอบการสอนกลศาสตร์ของไหล. สืบค้น 5 พฤษภาคม 2563, จาก www.me.eng.kps.ku.ac.th.
- สุเทพ แก้วนิย. (2554). คู่มือปั๊ม Pump Handbook. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป
- สุรพล ราชภูริชัย. (2549). วิศวกรรมการหล่อลื่นเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.

- Abed, K., et al., Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Egyptian journal of petroleum*, 2019. 28(2): p. 183-188.
- Aengchuan, P., et al., Prediction of the influence of castor oil–ethanol–diesel blends on single-cylinder diesel engine characteristics using generalized regression neural networks (GRNNs). *Energy Reports*, 2022. 8: p. 38-47.
- Agbulut U, Ayyıldız M, Sarıdemir S. Prediction of performance, combustion and emission characteristics for a CI engine at varying injection pressures. *Energy* 2020;197:117257.
- Alahmer, A., et al., Engine performance using emulsified diesel fuel. *Energy Conversion Management*, 2010. 51(8): p. 1708-1713.
- Alkabbashi, A.N., 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.
- Allami, H.A., et al., Modeling and optimization of performance and emission parameters of a diesel engine: A comparative evaluation between date seed oil biodiesel produced via three different heating systems. *Energy Conversion and Management*, 2023. 283: p. 116909.
- An, H., et al., Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions. *Applied Energy*, 2012. 99: p. 363-371.
- Ben-Daya, M., Kumar, U., & Murthy P. (2016). System Degradation and Failure. In A. Hunt, T. Carter, & C. Lawson (Eds.), *Introduction to maintenance engineering Modeling, Optimization, and management* (pp. 51-71). John Wiley & Sons.
- Bendu, H., B. Deepak, and S. Murugan, Multi-objective optimization of ethanol fuelled HCCI engine performance using hybrid GRNN–PSO. *Applied Energy*, 2017. 187: p. 601-611.
- Blank, J. and K. Deb. A running performance metric and termination criterion for evaluating evolutionary multi-and many-objective optimization algorithms. in *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. 2020. IEEE.
- Boonrod, B., Rochpuang, C., Paisan, T., Prapainainar, C., Seubsai, A., Hongloi, N., & Prapainainar, P. (2020). Optimization of Operating Conditions of Bio-

- Hydrogenated Diesel Production from Fatty Acid. *Chemical Engineering Transactions*, 78, 397-402.
- BS EN ISO 12156-1:2006. Diesel fuel, Assessment of lubricity using the high frequency reciprocating rig (HFRR). Part 1: Test method.
- Cahyo, N., et al., Impact of crude palm oil on engine performance, emission product, deposit formation, and lubricating oil degradation of low-speed diesel engine: An experimental study. *Results in Engineering*, 2023. 18: p. 101156.
- Canakci M, Ozsezen AN, Arcaklioglu E, Erdil A. Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil. *Expert Syst Appl* 2009;36(5):9268–80.
- Channapattana SV, Pawar AA, Kamble PG. Optimisation of operating parameters of DI- CI engine fueled with second generation Bio-fuel and development of ANN based prediction model. *Appl Energy* 2017;187:84–95.
- Cheng, R., et al., A reference vector guided evolutionary algorithm for many-objective optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016. 20(5): p. 773-791.
- Chong, E.K. and S.H. Żak, *An introduction to optimization*. Vol. 75. 2013: John Wiley & Sons.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency, M.o.E., Thailand, *Alternative Energy Development Plan 2018-2037 (AEDP 2018-2037)*. 2018.
- Dhar, A., & Agarwal, A. K. (2014). Effect of Karanja biodiesel blend on engine wear in a diesel engine. *Fuel*, 134, 81-89.
- Dobrzyńska, E., et al., Exhaust emissions from diesel engines fueled by different blends with the addition of nanomodifiers and hydrotreated vegetable oil HVO. *Environmental pollution*, 2020. 259: p. 113772.
- Domínguez-Saez ´ A, Ratta ´ GA, Barrios CC. Prediction of exhaust emission in transient conditions of a diesel engine fueled with animal fat using Artificial Neural Network and Symbolic Regression. *Energy* 2018;149:675–83.
- Farooqui, S., et al., *Green Diesel Production by Hydroprocessing Technology*, in *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*. 2022, Springer. p. 109-148.

- Fathurrahman, N.A., et al., Lubricity Properties of Palm Oil Biodiesel Blends with Petroleum Diesel and Hydrogenated Vegetable Oil. *Lubricants*, 2023. 11(4): p. 176.
- Fluid life. (2022). Potential source of spectrometry metals. Retrieved 15 June 2022 from <https://www.fluidlife.com/resource-center/potential-source-of-spectrometry-metals-pdf/>
- Fluid life. (2022). Wear metal origins reference chart. Retrieved 15 June 2022 from <https://www.fluidlife.com/resource-center/wear-metal-origins-pdf/>
- Focus lab. (2015). How to read ferrographic analysis-report. Retrieved 15 February 2022 https://www.focuslab.co.th/th/tech_article.php
- Focus lab. (2015). How to read oil analysis. Retrieved 15 February 2022 from https://www.focuslab.co.th/th/tech_article.php
- Focus lab. (2015). PQ index or particle quantifier index. Retrieved 15 February 2022g from https://www.focuslab.co.th/th/tech_article.php
- Geller, D. P., & Goodrum, J. W. (2004). Effects of specific fatty acid methyl esters on diesel fuel lubricity. *Fuel*, 83(17-18), 2351-2356.
- Hassan, T., et al., Effect of Ni and Al nanoadditives on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel-castor oil biodiesel-n-butanol blends. *Case Studies in Chemical Environmental Engineering*, 2023. 8: p. 100531.
- Hemanandh, J. and K. Narayanan, Emission and Performance analysis of hydrotreated refined sunflower oil as alternate fuel. *Alexandria Engineering Journal*, 2015. 54(3): p. 389-393.
- Hunicz, J., et al., Efficient hydrotreated vegetable oil combustion under partially premixed conditions with heavy exhaust gas recirculation. *Fuel*, 2020. 268: p. 117350.
- İlkiliç, C. and H. Aydın, The harmful effects of diesel engine exhaust emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, Environmental Effects*, 2012. 34(10): p. 899-905.

- Jin, Y., et al., Data-driven evolutionary optimization: An overview and case studies. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2018. 23(3): p. 442-458.
- Kaewbuddee, C., et al., Effects of Alcohol-Blended Waste Plastic Oil on Engine Performance Characteristics and Emissions of a Diesel Engine. *Energies*, 2023. 16(3): p. 1281.
- Karthickeyan V, Balamurugan P, Rohith G, Senthil R. Developing of ANN model for prediction of performance and emission characteristics of VCR engine with orange oil biodiesel blends. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2017;39(7):2877–88.
- Knothe, G. and K.R. Steidley, Lubricity of components of biodiesel and petrodiesel. The origin of biodiesel lubricity. *Energy & fuels*, 2005. 19(3): p. 1192-1200.
- Kshirsagar CM, Anand R. Artificial neural network applied forecast on a parametric study of Calophyllum inophyllum methyl ester-diesel engine out responses. *Appl Energy* 2017;189:555–67.
- Kumar DV, Kumar PR, Kumari MS. Prediction of performance and emissions of a biodiesel fueled lanthanum zirconate coated direct injection diesel engine using artificial neural networks. *Procedia Eng.* 2013;64:993–1002.
- Kumar Singh, Nishant, Singh, Yashvir, Sharma, Abhishek, Kumar, Sanjeev . (2020). Diesel engine performance and emission analysis running on jojoba biodiesel using intelligent hybrid prediction techniques. *Fuel*, 279()
- Lapuerta, M., et al., Effect of fatty acid composition of methyl and ethyl esters on the lubricity at different humidities. *Fuel*, 2016. 184: p. 202-210.
- Lapuerta, M., J. Sánchez-Valdepeñas, and E. Sukjit, Effect of ambient humidity and hygroscopy on the lubricity of diesel fuels. *Wear*, 2014. 309(1-2): p. 200-207.
- Lapuerta, Magin, Sánchez-Valdepeñas, Jesús, Sukjit, Ekarong . (2014). Effect of ambient humidity and hygroscopy on the lubricity of diesel fuels. *Wear*, 309(1-2), 200–207.
- Lewis, C.D., *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting.* (No Title), 1982.
- Li, H., et al., Comparison between MOEA/D and NSGA-III on a set of novel many and multi-objective benchmark problems with challenging difficulties. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019. 46: p. 104-117.

- Li, X., et al., Many-objective rapid optimization of reactor shielding design based on NSGA-III. *Annals of Nuclear Energy*, 2022. 177: p. 109322.
- Liu, Q., et al., Multi-objective metaheuristics for discrete optimization problems: A review of the state-of-the-art. *Applied Soft Computing*, 2020. 93: p. 106382.
- Liu, Yanyong, Sotelo-Boyás, Rogelio, Murata, Kazuhisa, Minowa, Tomoaki, Sakanishi, Kinya . (2012). Production of Bio-Hydrogenated Diesel by Hydrotreatment of High-Acid-Value Waste Cooking Oil over Ruthenium Catalyst Supported on Al-Polyoxocation-Pillared Montmorillonite. *Catalysts*, 2(4), 171–190.
- Liu, Z. and H. Wang, A data augmentation based Kriging-assisted reference vector guided evolutionary algorithm for expensive dynamic multi-objective optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022. 75: p. 101173.
- M.A. Fayad, A. Tsolakis, D. Fernández-Rodríguez, J.M. Herreros, F.J. Martos, M. Lapuerta, Manipulating modern diesel engine particulate emission characteristics through butanol fuel blending and fuel injection strategies for efficient diesel oxidation catalysts, *Appl Energy*. 190 (2017) 490-500.
- Magin Lapuerta, Monserrat Villajos, John R. Agudelo, André L. Boehman. (2011). Key properties and blending strategies of hydrotreated vegetable oil as biofuel for diesel engines. , 92(12), 2406–2411.
- Mangesh, V., et al., Combustion and emission analysis of hydrogenated waste polypropylene pyrolysis oil blended with diesel. *Journal of hazardous materials*, 2020. 386: p. 121453.
- Mohamed Ismail H, Ng HK, Queck CW, Gan S. Artificial neural networks modelling of engine-out responses for a light-duty diesel engine fuelled with biodiesel blends. *Appl Energy* 2012;92:769–77.
- Mozaffar, M., et al., Mechanistic artificial intelligence (mechanistic-AI) for modeling, design, and control of advanced manufacturing processes: Current state and perspectives. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022. 302: p. 117485.
- Nabi, M., et al., Investigation of engine performance, combustion, and emissions using waste tire Oil-Diesel-Glycine max biodiesel blends in a diesel engine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022.

- Nabi, M.N., et al., Investigation of engine performance, combustion, and emissions using waste tire Oil-Diesel-Glycine max biodiesel blends in a diesel engine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022. 39: p. 102435.
- Neville, W., & Sachs, P.E. (2007). Some General Considerations on Failure Analysis. In L.L. Faulkner (Ed), *Practical plant failure analysis a guide to understanding machinery deterioration and improving equipment reliability* (pp. 15-24). Taylor & Francis Group.
- Nivin Chacko, Clinton Johnson, Premnath Varadarajan, Sajja Sai Srinivas, Thangaraja Jeyaseelan, A comparative evaluation of cetane enhancing techniques for improving the smoke, NO_x and BSFC trade-off in an automotive diesel engine, *Fuel*, Volume 289, 2021, 119918, ISSN 0016-2361
- No, S.-Y., Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines–A review. *Fuel*, 2014. 115: p. 88-96.
- O.J. 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.
- Patel, C., et al., Comparative compression ignition engine performance, combustion, and emission characteristics, and trace metals in particulates from Waste cooking oil, *Jatropha* and *Karanja* oil derived biodiesels. *Fuel*, 2019. 236: p. 1366-1376.
- Pehan, S., Jerman, M. S., Kegl, M., & Kegl, B. (2009). Biodiesel influence on tribology characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 88(6), 970-979.
- Prasada Rao K, Victor Babu T, Anuradha G, Appa Rao BV. IDI diesel engine performance and exhaust emission analysis using biodiesel with an artificial neural network (ANN). *Egypt J Pet* 2017;26(3):593–600.
- Ramesh, P., S. Vivekanandan, and D. Prakash, Performance optimization of an engine for canola oil blended diesel with Al₂O₃ nanoparticles through single and multi-objective optimization techniques. *Fuel*, 2021. 288: p. 119617.
- Razmi, A., M. Rahbar, and M. Bemanian, PCA-ANN integrated NSGA-III framework for dormitory building design optimization: Energy efficiency, daylight, and thermal comfort. *Applied Energy*, 2022. 305: p. 117828.

- Sakkampang, C., et al., Performance, exhaust emission, and wear behavior of a direct-injection engine using biodiesel from Yang-Na (*Dipterocarpus Alatus*) oleoresins. *Case Studies in Chemical Environmental Engineering*, 2023. 7: p. 100328.
- Sharma A, Sahoo PK, Tripathi RK, Meher LC. Artificial neural network-based prediction of performance and emission characteristics of CI engine using polangaas a biodiesel. *Int J Ambient Energy* 2016;37(6):559–70.
- Sukjit, E. and K. Dearn, Enhancing the lubricity of an environmentally friendly Swedish diesel fuel MK1. *Wear*, 2011. 271(9-10): p. 1772-1777.
- Sukjit, E., Herreros, J. M., Dearn, K. D., García-Contreras, R., & Tsolakis, A. (2012). The effect of the addition of individual methyl esters on the combustion and emissions of ethanol and butanol -diesel blends. *Energy*, 42(1), 364-374.
- Sukjit, E., J.M. Herreros, K. Dearn, A. Tsolakis, Improving ethanol-diesel blend through the use of hydroxylated biodiesel, *SAE Tech. Pap.* 2014-01-2776 (2014).
- Sukjit, E., K.D. Dearn, and A. Tsolakis, Interrogating the surface: The effect of blended diesel fuels on lubricity. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2012. 5(1): p. 154-162.
- Sukjit, E., Poapongsakorn, P., Dearn, K. D., Lapuerta, M., & Sánchez-Valdepeñas, J. (2017). Investigation of the lubrication properties and tribological mechanisms of oxygenated compounds. *Wear*, 376-377, 836-842.
- Sulek, M., A. Kulczycki, and A. Malysa, Assessment of lubricity of compositions of fuel oil with biocomponents derived from rape-seed. *Wear*, 2010. 268(1-2): p. 104-108.
- Suthisripok, T., & Semsamran, P. (2018). The impact of biodiesel B100 on a small agricultural diesel engine. *Tribology International*, 128, 397-409.
- Tsolakis, A, Megaritis, A., Wyszynski, ML., & Theinnoi K., Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation), *Energy*. 32 (2007) 2072-80.
- Wang, H., et al., Machine learning-based fatigue life prediction of metal materials: Perspectives of physics-informed and data-driven hybrid methods. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023: p. 109242.

- Wang, X., et al., A two-stage adaptive reference direction guided evolutionary algorithm with modified dominance relation for many-objective optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2023. 78: p. 101272.
- Wiangkham, A., A. Ariyarat, and P. Aengchuan, Prediction of the influence of loading rate and sugarcane leaves concentration on fracture toughness of sugarcane leaves and epoxy composite using artificial intelligence. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022. 117: p. 103188.
- Xue, A., et al., Estimating state of health of lithium-ion batteries based on generalized regression neural network and quantum genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 2022. 130: p. 109688.
- Ye, H., et al., Modeling energy-related CO₂ emissions from office buildings using general regression neural network. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018. 129: p. 168-174.
- Zhan, Z.-H., et al., A survey on evolutionary computation for complex continuous optimization. *Artificial Intelligence Review*, 2022: p. 1-52.
- Zhang, J., X. Zhu, and P. Li, MOEA/D with many-stage dynamical resource allocation strategy to solution of many-objective OPF problems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020. 120: p. 106050.
- Zubel, M., et al., Advanced fuel formulation approach using blends of paraffinic and oxygenated biofuels: analysis of emission reduction potential in a high efficiency diesel combustion system. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2016. 9(3): p. 481-492.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์



ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

Fuel	RPM	Load(%)	BSFC (g/kW*hr)				Thermal eff.(%)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
Diesel	2,000	25%	535.37	534.44	533.94	534.58	14.81	14.84	14.85	14.84
		50%	359.51	359.40	359.87	359.59	22.06	22.07	22.04	22.06
		75%	289.45	289.54	289.08	289.36	27.40	27.39	27.44	27.41
		90%	316.89	315.50	316.96	316.45	25.03	25.14	25.02	25.06
	2,500	25%	464.24	463.35	467.81	465.13	17.08	17.12	16.95	17.05
		50%	323.56	323.29	324.36	323.73	24.51	24.53	24.45	24.50
		75%	275.62	274.97	274.92	275.17	28.78	28.84	28.85	28.82
		90%	297.21	297.03	296.85	297.03	26.69	26.70	26.72	26.70
	3,000	25%	483.52	483.15	483.39	483.35	16.40	16.42	16.41	16.41
		50%	385.80	386.62	384.70	385.70	20.56	20.51	20.62	20.56
		75%	297.99	300.99	297.33	298.76	26.62	26.35	26.68	26.55
		90%	319.63	320.38	318.37	319.46	24.81	24.76	24.91	24.83
BHD	2,000	25%	498.19	498.36	498.74	498.43	15.37	15.36	15.35	15.36
		50%	374.80	377.58	376.73	376.36	20.43	20.28	20.32	20.34
		75%	271.42	271.17	271.41	271.33	28.21	28.23	28.21	28.22
		90%	304.12	303.80	306.51	304.80	25.18	25.20	24.98	25.12
	2,500	25%	415.82	415.83	415.02	415.55	18.41	18.41	18.45	18.42
		50%	306.06	306.68	306.19	306.31	25.02	24.96	25.01	25.00
		75%	256.03	256.28	257.71	256.67	29.90	29.87	29.71	29.83
		90%	280.31	279.63	282.87	280.93	27.31	27.38	27.07	27.25
	3,000	25%	517.83	517.76	516.04	517.21	14.79	14.79	14.84	14.80
		50%	370.39	370.64	372.80	371.27	20.67	20.66	20.54	20.62
		75%	270.13	267.59	268.35	268.69	28.34	28.61	28.53	28.50
		90%	309.99	309.62	312.74	310.77	24.70	24.73	24.48	24.64

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

Fuel	RPM	Load(%)	BSFC (g/kW*hr)				Thermal eff.(%)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
Bio100%	2,000	25%	654.58	654.76	654.29	654.54	13.88	13.88	13.89	13.88
		50%	494.69	496.29	494.84	495.27	18.37	18.31	18.36	18.35
		75%	387.26	387.61	385.31	386.72	23.46	23.44	23.58	23.50
		90%	409.86	408.85	410.91	409.87	22.17	22.22	22.11	22.17
	2,500	25%	530.89	530.39	530.29	530.52	17.12	17.13	17.13	17.13
		50%	444.69	445.63	445.57	445.30	20.43	20.39	20.39	20.41
		75%	371.61	364.88	372.49	369.63	24.45	24.90	24.39	24.58
		90%	416.54	415.05	412.34	414.63	21.81	21.89	22.04	21.91
	3,000	25%	687.31	687.43	690.08	688.27	13.22	13.22	13.17	13.20
		50%	482.23	482.29	481.43	481.98	18.84	18.84	18.87	18.85
		75%	430.78	433.58	430.92	431.76	21.09	20.96	21.09	21.04
		90%	469.45	465.06	457.10	463.81	19.36	19.54	19.88	19.59
Bio10%	2,000	25%	525.37	523.54	526.82	525.24	14.81	14.86	14.77	14.81
		50%	363.11	362.99	362.83	362.98	21.42	21.43	21.44	21.43
		75%	288.70	288.29	289.22	288.74	26.94	26.98	26.90	26.94
		90%	319.11	319.73	321.22	320.02	24.38	24.33	24.22	24.31
	2,500	25%	429.80	428.99	428.00	428.93	18.10	18.13	18.17	18.14
		50%	320.05	319.58	319.31	319.65	24.30	24.34	24.36	24.34
		75%	269.46	268.27	269.82	269.18	28.87	29.00	28.83	28.90
		90%	287.98	287.75	290.29	288.67	27.01	27.03	26.80	26.95
	3,000	25%	473.23	470.52	474.19	472.64	16.44	16.53	16.40	16.46
		50%	347.00	345.77	347.39	346.72	22.42	22.50	22.39	22.44
		75%	287.97	290.97	289.51	289.48	27.01	26.73	26.87	26.87
		90%	302.75	306.87	303.69	304.42	25.69	25.35	25.61	25.55

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

Fuel	RPM	Load(%)	BSFC (g/kW*hr)				Thermal eff.(%)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
Bio20%	2,000	25%	568.12	566.92	568.63	567.89	13.91	13.94	13.90	13.92
		50%	375.48	374.83	376.60	375.64	21.05	21.09	20.99	21.04
		75%	299.43	298.99	298.24	298.88	26.40	26.44	26.51	26.45
		90%	331.98	332.68	336.20	333.61	23.81	23.76	23.51	23.70
	2,500	25%	450.93	450.52	450.07	450.51	17.53	17.55	17.56	17.55
		50%	328.38	329.81	330.66	329.62	24.07	23.97	23.91	23.98
		75%	286.82	285.62	283.87	285.43	27.56	27.68	27.85	27.70
		90%	309.15	309.01	308.45	308.87	25.57	25.58	25.63	25.59
	3,000	25%	502.81	504.26	505.21	504.09	15.72	15.68	15.65	15.68
		50%	361.61	360.00	359.35	360.32	21.86	21.96	22.00	21.94
		75%	300.48	301.16	300.29	300.64	26.31	26.25	26.33	26.29
		90%	324.13	324.01	324.66	324.27	24.39	24.40	24.35	24.38
Bio30%	2,000	25%	627.64	627.59	628.26	627.83	12.80	12.80	12.79	12.80
		50%	424.73	424.54	423.67	424.31	18.92	18.93	18.97	18.94
		75%	326.48	325.82	328.28	326.86	24.61	24.66	24.48	24.58
		90%	347.28	349.08	348.10	348.15	23.14	23.02	23.08	23.08
	2,500	25%	511.17	510.17	508.82	510.05	15.72	15.75	15.79	15.75
		50%	356.24	357.28	357.21	356.91	22.56	22.49	22.50	22.51
		75%	306.69	304.20	303.89	304.92	26.20	26.42	26.44	26.35
		90%	318.47	317.07	317.80	317.78	25.23	25.34	25.29	25.29
	3,000	25%	552.94	554.33	556.61	554.62	14.53	14.50	14.44	14.49
		50%	399.21	399.84	399.20	399.41	20.13	20.10	20.13	20.12
		75%	320.63	322.94	321.83	321.79	25.06	24.88	24.97	24.97
		90%	330.51	334.06	333.60	347.09	24.31	24.05	24.09	23.15

ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวัดมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์



ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบมลพิษเครื่องยนต์

Fuel	RPM	Load (%)	HC (ppm)				CO (ppm)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
Diesel	2,000	25%	194.89	189.02	207.08	197	340.26	339.05	359.68	346.33
		50%	163.44	161.51	182.05	169	548.47	550.05	520.48	539.67
		75%	164.28	169.83	187.89	174	700.17	691.54	705.29	699
		90%	330.42	326.94	319.63	325.67	1024.17	1025.21	1038.62	1029.33
	2,500	25%	284.98	295.09	279.93	286.67	313.5	308.94	314.56	312.33
		50%	401.96	379.85	421.2	401	499.12	501.43	500.45	500.33
		75%	459.39	439.8	463.82	454.33	685.07	696.69	660.24	680.67
		90%	597.6	583.13	550.27	577	945.57	957.06	958.36	953.67
	3,000	25%	659.72	674.96	674.31	669.67	270.08	274.23	296.69	280.33
		50%	617.38	628.87	626.75	624.33	320.17	316.62	324.21	320.33
		75%	551.46	565.81	537.73	551.67	652.9	641.4	615.7	636.67
		90%	853.48	842.78	850.74	849	916.56	916.95	905.49	913
BHD	2,000	25%	150.79	139.7	142.51	144.33	165.92	166.73	163.35	165.33
		50%	101.15	104.32	91.53	99	352.9	352.56	342.55	349.33
		75%	81.4	82.43	86.17	83.33	594.79	614.79	605.42	605
		90%	280.17	257.78	287.05	275	748.32	745.07	774.62	756
	2,500	25%	230.83	227.63	230.53	229.67	246.06	222.59	256.36	241.67
		50%	293.15	305.07	302.78	300.33	379.98	381.04	394.98	385.33
		75%	282.04	301.89	331.07	305	507.18	510.11	510.7	509.33
		90%	507.91	512.97	534.12	518.33	688.68	678.09	693.23	686.67
	3,000	25%	537.22	543.74	529.04	536.67	237.4	235.31	230.29	234.33
		50%	489.73	490.88	493.39	491.33	311.39	312.69	287.92	304
		75%	388.91	413.81	391.28	398	439.29	440.46	486.25	455.33
		90%	678.83	687.27	712.9	693	602.81	602.22	611.97	605.67
Bio100%	2,000	25%	486.82	485.99	497.19	490	445.46	454.78	434.75	445

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบมลพิษเครื่องยนต์

Fuel	RPM	Load (%)	HC (ppm)				CO (ppm)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
		50%	364.72	381.86	365.42	370.67	668.47	656.71	671.83	665.67
		75%	320.27	310.7	295.03	308.67	957.85	949.51	949.63	952.33
		90%	624.11	614.52	591.37	610	1261.99	1261.39	1264.62	1262.67
	2,500	25%	346.67	337.49	381.84	355.33	374.05	406.06	385.89	388.67
		50%	466.95	466.54	492.51	475.33	583.88	588.27	572.85	581.67
		75%	513.51	489.08	541.41	514.67	837.86	841.4	817.75	832.33
	3,000	90%	689.59	684.55	678.86	684.33	1112.96	1117.02	1090.02	1106.67
		25%	897.1	898.55	905.34	900.33	349.43	354.55	349.03	351
		50%	854.15	854.47	853.39	854	525.55	536.83	549.62	537.33
		75%	689.63	664.08	693.3	682.33	754.07	764.61	735.32	751.33
		90%	1024.87	1042.1	1062.03	1043	1035.34	1036.5	1031.15	1034.33
Bio10%	2,000	25%	314.84	305.4	273.75	298	215.53	221.08	221.39	219.33
		50%	188.8	178.85	180.35	182.67	410.08	405.69	387.23	401
		75%	205.94	220.89	196.17	207.67	657.18	637.86	611.96	635.67
		90%	414.03	426.23	411.73	417.33	941.97	941.17	926.86	936.67
	2,500	25%	244.58	233.78	231.65	236.67	240.26	243.23	244.5	242.67
		50%	338.66	346.9	316.44	334	425.58	437.48	390.94	418
		75%	348.67	346.37	322.96	339.33	582.5	577.64	570.86	577
		90%	554.5	548.36	522.14	541.67	789.71	786.71	792.58	789.67
	3,000	25%	720.54	724.43	792.03	745.67	284.2	278.88	275.92	279.67
		50%	670.75	657.07	660.19	662.67	397.46	400.93	373.61	390.67
		75%	429.23	408.86	437.9	425.33	549	536.75	547.24	544.33
		90%	830.11	811.75	792.14	811.33	749.96	740.61	742.42	744.33
Bio20%	2,000	25%	337.94	326.12	347.94	337.33	287.78	287.32	289.9	288.33
		50%	229.88	245.98	248.14	241.33	468.31	461.41	461.28	463.67

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบมลพิษเครื่องยนต์

Fuel	RPM	Load (%)	HC (ppm)				CO (ppm)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
		75%	227.66	231.28	235.06	231.33	752.63	760.67	748.69	754
		90%	483.14	474.99	470.86	476.33	971.47	970.77	977.76	973.33
	2,500	25%	289.43	267.97	250.6	269.33	217.14	196.53	217.33	210.33
		50%	386.22	385.93	315.85	362.67	456.42	458.99	437.59	451
		75%	359.55	363.13	338.32	353.67	606.36	597.74	604.9	603
		90%	563.72	570.88	556.4	563.67	877.84	878.21	858.95	871.67
	3,000	25%	753.25	786.12	787.63	775.67	308.8	309	308.2	308.67
		50%	731.19	720.72	738.1	730	419.89	422.87	439.24	427.33
		75%	457.02	489.29	482.69	476.33	567.24	574.87	550.89	564.33
		90%	887.39	884.05	863.56	878.33	774.39	783.25	755.37	771
Bio30%	2,000	25%	373.91	368.62	390.48	377.67	301.73	305.89	310.38	306
		50%	258.76	252.25	245.99	252.33	471.69	478.78	488.53	479.67
		75%	273.68	263.12	304.19	280.33	813.72	808.73	813.55	812
		90%	521.77	510.19	522.04	518	1058.44	1056.21	1052.35	1055.67
	2,500	25%	292.17	286.27	285.57	288	276.31	271.75	288.94	279
		50%	403.18	391.92	401.91	399	489.35	502.67	500.98	497.67
		75%	397.07	412.45	369.48	393	664.67	661.78	657.55	661.33
		90%	598.76	586.4	557.84	581	968.53	973.5	975.97	972.67
	3,000	25%	802.03	790.48	802.49	798.33	348.6	346.64	366.77	354
		50%	752.87	761.14	773.99	762.67	447.13	430.61	451.25	443
		75%	503.02	517.11	502.88	507.67	619.72	625.59	590.7	612
		90%	903.86	891.93	885.21	893.67	804.13	806.31	782.56	797.67

Fuel	RPM	Load(%)	NOx(ppm)				Smoke (1/m)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
Diesel	2,000	25%	254.61	250.34	247.16	250.7	0.482	0.55	0.56	0.53
		50%	508.75	505.63	500.62	505	0.57	0.58	0.54	0.56
		75%	632.18	653.3	637.02	640.83	0.663	0.59	0.68	0.65
		90%	715.67	723.79	718.85	719.43	0.558	0.72	0.82	0.7
	2,500	25%	363.24	357.28	365.68	362.07	0.411	0.42	0.48	0.44
		50%	513.18	516.35	546.17	525.23	0.45	0.56	0.46	0.49
		75%	758.96	759.84	745.2	754.67	0.527	0.53	0.58	0.55
		90%	874	874.22	858.98	869.07	0.564	0.53	0.73	0.61
	3,000	25%	326.18	325.5	334.02	328.57	0.278	0.25	0.23	0.25
		50%	388.02	394.83	388.45	390.43	0.383	0.35	0.32	0.35
		75%	589.33	581.17	566.2	578.9	0.364	0.44	0.38	0.4
		90%	663.07	662.75	657.09	660.97	0.411	0.36	0.57	0.45
BHD	2,000	25%	305.03	308.67	293.3	302.33	0.393	0.36	0.39	0.38
		50%	601.33	601.88	595.89	599.7	0.379	0.46	0.37	0.4
		75%	687.66	681.35	676.89	681.97	0.474	0.47	0.54	0.5
		90%	760.18	765.56	754.06	759.93	0.52	0.47	0.55	0.52
	2,500	25%	396.51	395.68	408.41	400.2	0.16	0.23	0.11	0.17
		50%	659.35	651.03	660.22	656.87	0.245	0.34	0.13	0.24
		75%	791.67	799.81	813.52	801.67	0.357	0.33	0.46	0.38
		90%	903.03	900.64	899.02	900.9	0.506	0.42	0.42	0.45
	3,000	25%	331.16	327.08	349.46	335.9	0.175	0.09	0.11	0.12
		50%	460.78	464.07	473.95	466.27	0.079	0.21	0.19	0.16
		75%	665.45	664.02	663.04	664.17	0.278	0.27	0.22	0.26
		90%	714.19	685.52	696.29	698.67	0.348	0.33	0.24	0.3

Fuel	RPM	Load(%)	NOx(ppm)				Smoke (1/m)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
Bio100%	2,000	25%	206.39	214.17	217.34	212.63	0.68	0.66	0.57	0.64
		50%	455.61	464.08	461	460.23	0.707	0.69	0.64	0.68
		75%	569.81	569.54	564.75	568.03	0.736	0.68	0.74	0.72
		90%	593.04	608.57	612.99	604.87	0.79	0.81	0.77	0.79
	2,500	25%	322.76	322.31	323.43	322.83	0.457	0.43	0.42	0.44
		50%	503.45	497.12	490.93	497.17	0.623	0.53	0.55	0.57
		75%	615.05	616.32	628.23	619.87	0.603	0.56	0.68	0.62
		90%	709.28	719.15	733.28	720.57	0.695	0.64	0.66	0.66
	3,000	25%	290.81	290.86	294.82	292.17	0.3	0.27	0.41	0.33
		50%	302.41	310.15	324.73	312.43	0.382	0.37	0.48	0.41
		75%	481.05	469.14	498.32	482.83	0.526	0.37	0.46	0.45
		90%	566.67	576.8	570.24	571.23	0.549	0.49	0.45	0.5
Bio10%	2,000	25%	295.01	297.89	303.3	298.73	0.471	0.45	0.36	0.43
		50%	511.18	509.21	506.61	509	0.492	0.44	0.47	0.47
		75%	675.78	678.53	676.99	677.1	0.552	0.52	0.52	0.53
		90%	711.71	711.73	715.66	713.03	0.56	0.61	0.49	0.55
	2,500	25%	358.91	376.64	347.15	360.9	0.17	0.12	0.4	0.23
		50%	583.06	582.34	572.8	579.4	0.411	0.27	0.22	0.3
		75%	729.87	732.44	738.88	733.73	0.377	0.5	0.42	0.43
		90%	836.65	847.35	841.21	841.73	0.452	0.45	0.58	0.49
	3,000	25%	318.08	312.38	325.14	318.53	0.248	0.23	0.11	0.2
		50%	416.34	412.21	403.55	410.7	0.231	0.22	0.16	0.2
		75%	621.65	632.68	623.47	625.93	0.362	0.3	0.26	0.31

Fuel	RPM	Load(%)	NOx(ppm)				Smoke (1/m)			
			1	2	3	avg	1	2	3	avg
		90%	676.93	687.79	687.38	684.03	0.439	0.4	0.29	0.38
Bio20%	2,000	25%	280.14	284.61	283.25	282.67	0.487	0.55	0.27	0.44
		50%	452.83	457.17	450.3	453.43	0.493	0.49	0.47	0.48
		75%	636.15	637.68	643.87	639.23	0.509	0.6	0.56	0.56
		90%	679.91	669.13	639.26	662.77	0.643	0.64	0.47	0.59
	2,500	25%	341.79	330.54	344.77	339.03	0.289	0.21	0.29	0.27
		50%	544.07	544.83	554.6	547.83	0.452	0.45	0.53	0.48
		75%	680.12	679.31	685.47	681.63	0.461	0.58	0.53	0.52
		90%	821.74	817.86	790.2	809.93	0.569	0.58	0.5	0.55
	3,000	25%	297.06	288.26	267.78	284.37	0.163	0.04	0.42	0.21
		50%	368.95	388.81	376.04	377.93	0.266	0.27	0.33	0.29
		75%	612.54	617.61	595.95	608.7	0.352	0.38	0.3	0.34
		90%	672.07	673.24	651.69	665.67	0.415	0.35	0.45	0.41
Bio30%	2,000	25%	256.38	244.6	251.12	250.7	0.436	0.46	0.5	0.47
		50%	427.18	418.22	412.9	419.43	0.543	0.51	0.53	0.53
		75%	607.38	602.42	605.8	605.2	0.698	0.66	0.51	0.62
		90%	621.01	624.58	621.71	622.43	0.615	0.6	0.69	0.63
	2,500	25%	317.83	320.19	317.18	318.4	0.264	0.24	0.51	0.34
		50%	506.76	510.76	508.28	508.6	0.49	0.55	0.47	0.5
		75%	654	643.55	646.95	648.17	0.441	0.52	0.8	0.59
		90%	758.83	766.98	766.39	764.07	0.592	0.61	0.61	0.6
	3,000	25%	285.68	273.17	274.66	277.83	0.281	0.28	0.14	0.24
		50%	348.2	359.06	359.63	355.63	0.298	0.38	0.34	0.34
		75%	574.44	574.72	562.54	570.57	0.364	0.45	0.31	0.37
		90%	650.37	647.72	641.31	646.47	0.48	0.4	0.43	0.44

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow structure resembling a traditional Thai stupa or a tiered umbrella, with a central figure of a person sitting on a pedestal. Below this figure is a circular emblem with a stylized 'S' and 'N' inside. The entire logo is encircled by a red and white scalloped border.

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดสอบคุณลักษณะการเผาไหม้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ค่าแรงดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,000 RPM

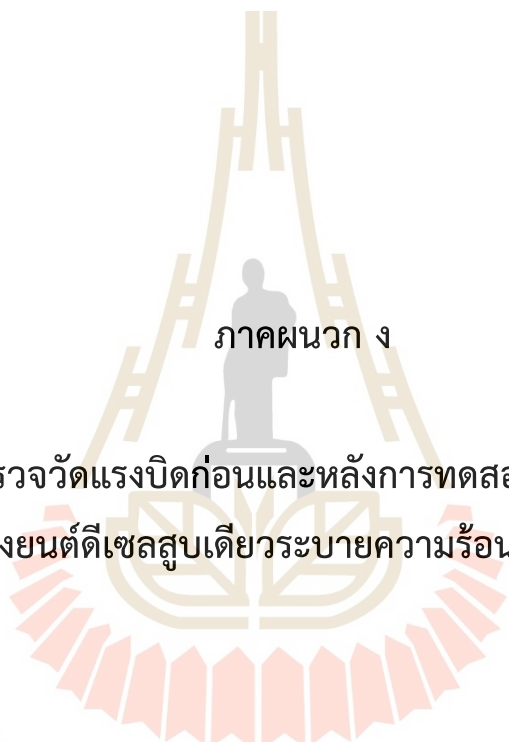
Fuel	Load	RPM			
		2,000			
		CA at HRR max	HRR Max	CA at P Max	Pressure Max
Diesel	25	-4	59.75	1	61.29
	50	-5	65.95	4	65.34
	75	-5	68.99	2	68.38
	90	-4	71.22	2	71.4
BHD	25	-7	41.46	1	60.77
	50	-8	38.93	1	63.73
	75	-8	40.43	1	65.86
	90	-9	38.64	2	67.87
Biodiesel	25	-4	52.21	3	61.2
	50	-4	61.33	3	64.58
	75	-4	58.76	4	67.03
	90	-4	58.12	5	70.14
BHD90	25	-7	43.19	2	60.88
	50	-7	42.04	2	64.4
	75	-8	41.76	2	66.12
	90	-8	37.31	2	68.25
BHD80	25	-7	39.24	2	60.42
	50	-7	36.5	2	62.89
	75	-8	38.27	2	65.65
	90	-8	38.45	2	67.66
BHD70	25	-6	40.45	2	60.93
	50	-6	44.16	3	64.11
	75	-7	45.05	3	66.52
	90	-7	43.57	3	68.98

ตารางที่ ค.2 ค่าแรงดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2,500 RPM

Fuel	Load	RPM			
		2,500			
		CA at HRR max	HRR Max	Ca at P Max	Pressure Max
Diesel	25	-2	60.37	2	62.52
	50	-2	65.15	2	66.19
	75	-2	71.61	4	69.32
	90	-2	66.81	5	72.64
BHD	25	-5	39.1	2	60.64
	50	-5	39.48	3	64.41
	75	-5	39.58	4	66.72
	90	-5	35.33	4	68.48
Biodiesel	25	-3	49.93	3	62.39
	50	-3	46.7	4	65.08
	75	-2	50.55	5	68.67
	90	-2	66.62	6	75.06
BHD90	25	-4	39.7	4	61.14
	50	-4	40.08	4	63.88
	75	-4	39.92	4	66.39
	90	-5	38.02	4	67.66
BHD80	25	-3	40.74	3	60.38
	50	-4	40.3	5	63.61
	75	-4	38.06	4	65.612
	90	-5	39.79	5	68.21
BHD70	25	-3	41.93	5	61.34
	50	-3	44.33	5	64.04
	75	-4	44.13	5	67.44
	90	-4	44.85	6	70.47

ตารางที่ ค.3 ค่าแรงดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดที่ความเร็วรอบ
เครื่องยนต์ 3,000 RPM

Fuel	Load	RPM			
		3,000			
		CA at HRR max	HRR Max	Ca at P Max	Pressure Max
Diesel	25	1	54.14	3	62.69
	50	0	54.63	4	67.34
	75	0	59.51	4	69.56
	90	-1	62.24	6	73.3
BHD	25	-2	30.66	4	60.45
	50	-2	29.32	4	62.27
	75	-3	33.44	5	65.19
	90	-3	37.81	6	69.33
Biodiesel	25	0	39.975	4	62.07
	50	1	39.19	5	63.38
	75	0	47.78	5	66.68
	90	1	43.36	7	66.04
BHD90	25	-1	28.35	3	59.54
	50	-2	27.46	5	61.72
	75	-3	29.03	5	63.87
	90	-3	28.02	4	64.43
BHD80	25	-1	30.53	3	60.13
	50	-2	29.05	4	61.91
	75	-2	32.07	5	63.82
	90	-2	36.52	8	67.96
BHD70	25	0	31.89	3	59.97
	50	-1	33.74	5	62.79
	75	-1	38.45	7	66.26
	90	-2	45.31	8	70.39

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow triangular structure with a silhouette of a person sitting on a throne in the center. Below the triangle is a circular emblem with a gear-like border. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a semi-circle at the bottom.

ภาคผนวก ง

ผลการตรวจวัดแรงบิดก่อนและหลังการทดสอบระยะยาวของ
เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวระบายความร้อนด้วยอากาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 ค่าแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลก่อนและหลังการทดสอบระยะยาว

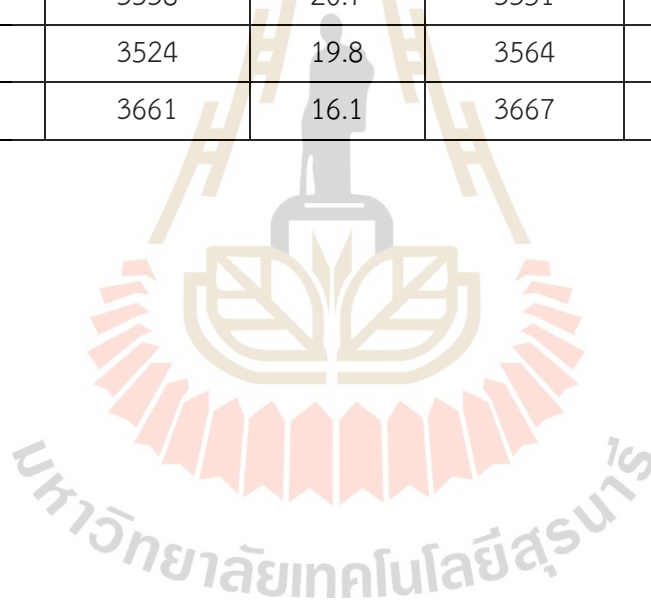
ก่อนทดสอบ			หลังทดสอบ		
ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลัง	ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลัง
1817	25.3	6.5	1815	21.8	5.6
1976	25.7	7.1	1905	22.1	5.9
2116	26.1	7.8	2079	22.7	6.6
2337	26.3	8.6	2302	22.7	7.3
2642	25.4	9.4	2648	21.1	7.8
2874	24.1	9.7	2864	20.6	8.3
3006	23.2	9.8	3014	19.7	8.3
3133	22.2	9.8	3209	18.5	8.3
3324	20.8	9.7	3334	17.7	8.3
3534	18.9	9.4	3515	16.1	7.9
3628	18	9.2	3591	14.2	7.2

ตารางที่ ง.2 ค่าแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD ก่อนและหลังการทดสอบ

ก่อนทดสอบ			หลังทดสอบ		
ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลัง	ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลัง
1819	25.37	6.47803	1726	17.66	4.278793
1944	25.6	6.985959	1916	19.6	5.271587
2121	26.1	7.770894	2223	21.9	6.833975
2325	26.5	8.648855	2367	21.7	7.210208
2627	25.9	9.551017	2628	21	7.747016
2840	24.4	9.727426	2801	20.3	7.981765
3041	22.5	9.604809	3031	18.9	8.041509
3146	21.5	9.494825	3134	18.3	8.050815
3306	19.9	9.235187	3312	17.07	7.936219
3551	16.8	8.374324	3511	14.45	7.121779
3591	11.5	5.796996	3642	9.56	4.88751

ตารางที่ ง.3 ค่าแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD90 ก่อนและหลังการทดสอบ

ก่อนทดสอบ			หลังทดสอบ		
ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลัง	ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลัง
1819	1806	25.4	1825	22.9	5.866622
1944	1969	25.7	1945	23.2	6.334282
2121	2106	25.8	2129	23.5	7.023172
2325	2356	25.5	2374	23.4	7.798056
2627	2630	24.5	2649	22.2	8.255145
2840	2871	23.3	2866	21.2	8.529073
3041	3030	22.9	3014	20.3	8.588732
3146	3126	22.4	3184	18.9	8.447431
3306	3338	20.7	3351	17	7.996743
3551	3524	19.8	3564	14.9	7.454418
3591	3661	16.1	3667	11.2	5.765258



ภาคผนวก จ

ผลการตรวจคุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล



Code : 28223
Name : Suranaree University of Technology
Address : 111 University Avenue,
 Muang District,
 Nakhon Ratchasima 30000
Site :
Location :
Test code : E804
Unit ID : 186F DPIJ16 for Diesel
Unit Type : Engine Diesel
Unit Make : KAWAMA
Unit Model : 186F
Oil type / Viscosity : PTT D3 PLUS SAE 40
Oil System Capacity : 1.65 Liters


Notes (Finding, Evaluation, Interpretation, Suggestion and Recommendation)

Note Iron - probable sources of wear are from cylinder liners and/or timing gears.
 Oil condition tests indicate that the base-oil is slightly degraded.
 All CONTAMINANT CONDITIONS and CONTAMINANT LEVELS appear in NORMAL ranges.

Jirak P./Sondha J.

			Current Sample			Previous Sample			Baseline and Alarm Limit							
Condition History			Wear	Oil	Cont.	Wear	Oil	Cont.	Wear	Oil	Cont.					
			W	C	N	C	C	N	C	N	N	B A S E L I N E	Alarm Limit			
			23064076			23064075			23064074				Alarm Limit Matrix - Set Name (Equipment type / oil type)			
Lab ID			176440			176439			167238				Engine Diesel General PTT D3			
Bottle ID			07-Apr-23			28-Mar-23			16-Mar-23				Plus SAE 40 (Suranaree)			
Date Sampled			200			100			20							
Oil Hours (Kms)			220			120			20							
Unit Hours (Kms)																
Oil Change																
Oil Added (Liters)			0.1			0.1										
Filters Hours (Kms)																
Wear Condition																
Wear Element	Method	Unit	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	The New Oil (TNO)	Fine Wear (ICP)	Coarse Wear (RFS)					
Iron	D-5185	PPM	159.7	W	28.2	C	71.5	21.5	25.1	9.3	0	>100	>200	>100	>200	
Chromium	D-5185	PPM	3.9		0.3		2.9	1.2	3.1	1.2	0	>5	>15	>5	>15	
Lead	D-5185	PPM	0.8		0.0		0.4	0.3	0.7	0.5	0	>20	>60	>20	>60	
Copper	D-5185	PPM	7.0		1.0		5.5	0.9	6.8	0.9	0	>10	>25	>10	>25	
Tin	D-5185	PPM	0.0		0.0		0.0	0.6	0.0	0.1	0	>10	>25	>10	>25	
Aluminum	D-5185	PPM	30.3	W	11.4	C	28.4	W	13.2	C	10.7	C	>10	>20	>10	>20
Nickel	D-5185	PPM	0.4		0.0		0.2	0.0	0.0	0.0	0	>5	>10	>5	>10	
Silver	D-5185	PPM	0.0		0.0		0.0	0.1	0.0	0.1	0					
Molybdenum	D-5185	PPM	0.1		0.0		0.3	0.0	0.4	0.0	1					
Titanium	D-5185	PPM	0.1		0.0		0.1	0.9	0.1	0.5	0					
PQ Index	D-8184	Index	50				14		44		0	>15	>20			
Oil Condition																
Viscosity @ 40° C	D-445	cSt					13.8		14.3		TNO	L-Warning	L-Caution	U-Caution	U-Warning	
Viscosity @ 100° C	D-445	cSt	13.2	C							14.8	<12.5	<13.7	>15.6	>16.3	
Oxidation	D-7414	Abs	17.6	W			11.2	W	5.1		4.0			>8	>9	
Nitration	D-7624	Abs/cm	5.5				3.6		2.2		0.4			>10	>25	
Acid Number	D-974	mg KOH/g														
Base Number	D-4739	mg KOH/g	8.4				9.3		5.7		7.2	<2	<3.6			
Contamination																
Water	E-2412	% (Wt)	0.077				0.072		0.064		TNO			U-Caution	U-Warning	
Fuel	In-house	% (Wt)	1.10				0.10		0.10		0.080			>0.15	>0.25	
Glycol	E-2412	Abs	N/A				N/A		N/A					>2	>5	
Soot in Oil	E-2412	% (Wt)	0.86				0.52		0.35					>3	>6	
Soot Dispersion (100-0)	D7899M	Index	60				70		90					<50	<30	
Vanadium	D-5185	PPM	0				0		0		0					
Sodium	D-5185	PPM	4				3		3		4					
Silicon	D-5185	PPM	21.0		6.6		19.3	7.7	20.6	15.3	13	>25	>50	>25	>50	
Potassium	D-5185	PPM	0.7				0.3		0.2							
Additive Element																
Boron	D-5185	PPM	1				1		2		TNO					
Magnesium	D-5185	PPM	669				701		861		3					
Calcium	D-5185	PPM	1747				1849		1732		816					
Barium	D-5185	PPM	1				1		1		2128					
Phosphorus	D-5185	PPM	754				829		836		0					
Zinc	D-5185	PPM	966		139		1026	130	991	133	1003					
											1216					
Additional Test																
Flash Point	D-3828	°C									TNO	L-Warning	L-Caution	U-Caution	U-Warning	
Viscosity Index	D-2270															

Note: Alarm Limits are variable and dependent upon dataset size and to be used as general guideline.

No Sign or **N** : NORMAL , **C** or **C** : CAUTION (first level warning limit) , **W** or **W** : Warning (second level warning limit)

Accuracy of interpretation and recommendation are based on representative sample and information supplied.

No warranty is expressed or implied for this report.

FocusLab Ltd. Bangkok Thailand www.focuslab.co.th focuslab@focuslab.co.th

FL-6.8

Page 1 of 5

ภาคผนวก ฉ

ผลการตรวจคุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Code : 28223
Name : Suranaree University of Technology
Address : 111 University Avenue,
 Muang District,
 Nakhon Ratchasima 30000
Site :
Location :
Test code : E804

Unit ID : 186F DPIJ16A for BHD
Unit Type : Engine Diesel
Unit Make : KAWAMA
Unit Model : 186F
Oil type / Viscosity : PTT D3 PLUS SAE 40
Oil System Capacity : 1.85 Liters


Notes (Finding, Evaluation, Interpretation, Suggestion and Recommendation)

Abnormal wear metals may indicate cylinder, piston and ring wear.

Note viscosity is lower than normal limits.

All CONTAMINANT CONDITIONS and CONTAMINANT LEVELS appear in NORMAL ranges.

Sendai J.

			Current Sample			Previous Sample			Baseline and Alarm Limit		
Condition History			Wear	Oil	Cont.	Wear	Oil	Cont.	Alarm Limit		
			C	W	N	C	C	N	Alarm Limit		
Lab ID			23064079			23064078			23064077		
Bottle ID			176443			176442			176441		
Date Sampled			26-May-23			15-May-23			04-May-23		
Oil Hours (Kms)			200			100			20		
Unit Hours (Kms)			220			120			20		
Oil Change											
Oil Added (Liters)			0.1			0.1					
Filters Hours (Kms)											
Wear Condition											
Wear Element	Method	Unit	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)		Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)		Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	
Iron	D-5185	PPM	272.8	174.7	C	72.0	15.9	C	56.7	46.5	C
Chromium	D-5185	PPM	5.2	1.3	C	2.6	0.2	C	2.4	1.4	C
Lead	D-5185	PPM	0.9	0.2	C	0.9	0.4	C	1.3	0.0	C
Copper	D-5185	PPM	7.1	1.0	C	5.0	0.6	C	8.8	1.9	C
Tin	D-5185	PPM	0.0	0.7	C	0.0	1.2	C	0.0	0.0	C
Aluminum	D-5185	PPM	40.8	16.3	C	21.0	15.4	C	14.3	12.5	C
Nickel	D-5185	PPM	0.4	0.3	C	0.1	0.0	C	0.0	0.0	C
Silver	D-5185	PPM	0.0	0.0	C	0.0	0.0	C	0.0	0.0	C
Molybdenum	D-5185	PPM	0.3	0.0	C	0.3	0.0	C	0.4	0.0	C
Titanium	D-5185	PPM	0.1	0.8	C	0.0	0.6	C	0.1	0.6	C
PQ Index	D-8184	Index	55			53			128		
Oil Condition											
Viscosity @ 40° C	D-445	cSt	12.3	W		13.8	W		14.4		
Viscosity @ 100° C	D-445	cSt	12.3	W		13.8	W		14.4		
Oxidation	D-7414	Abs	14.0	W		9.3	W		4.4		
Nitration	D-7624	Abs	6.3			4.4			2.2		
Acid Number	D-974	mg KOH/g	8.2			9.9			6.1		
Base Number	D-4739	mg KOH/g	8.2			9.9			6.1		
Contamination											
Water	E-2412	% (Wt.)	0.067			0.062			0.063		
Fuel	In-house	% (Wt.)	1.40			1.40			0.10		
Glycol	E-2412	Abs	N/A			N/A			N/A		
Soot in Oil	E-2412	% (Wt.)	0.73			0.57			0.37		
Soot Dispersion (100-2)	D7889M	Index	60			70			90		
Vanadium	D-5185	PPM	0			0			0		
Sodium	D-5185	PPM	5			4			5		
Silicon	D-5185	PPM	16.7	6.9		15.3	5.2		17.8	10.5	
Potassium	D-5185	PPM	0.4			0.2			0.4		
Additive Element											
Boron	D-5185	PPM	1			1			1		
Magnesium	D-5185	PPM	745			743			707		
Calcium	D-5185	PPM	1966			1974			1874		
Barium	D-5185	PPM	1			1			1		
Phosphorus	D-5185	PPM	807			866			903		
Zinc	D-5185	PPM	1064	142		1077	122		1054	139	
Additional Test											
Flash Point	D-3828	°C									
Viscosity Index	D-2270										

Note: Alarm Limits are variable and dependent upon dataset size and to be used as general guideline.

No Sign or N : NORMAL, C or W : CAUTION (first level warning limit), W or W : Warning (second level warning limit)

Accuracy of interpretation and recommendation are based on representative sample and information supplied.

No warranty is expressed.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a lotus flower. The entire emblem is encircled by a ring of red and orange petals. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ข

ผลการตรวจสอบบันทึกน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน BHD90

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Code : 28223
Name : Suranaree University of Technology
Address : 111 University Avenue,
 Muang District,
 Nakhon Ratchasima 30000
Site :
Location :
Test code : E804

Unit ID : 186F DPIJ16A For BHD90
Unit Type : Engine Diesel
Unit Make : KAWAMA
Unit Model : 186F
Oil type / Viscosity : PTT D3 PLUS SAE 40
Oil System Capacity : 1.65 Liters


Notes (Finding, Evaluation, Interpretation, Suggestion and Recommendation)

Note Iron - probable sources of wear are from cylinder liners and/or timing gears.

Fuel dilution detected. Recommend check fuel injection system for proper operation, leaking injectors, pump pressure, pump timing or leaks of fuel into the oil.

Low viscosity probably due to the fuel dilution taking place.

			Current Sample			Previous Sample			Baseline and Alarm Limit		
Condition History			Wear	Oil	Cont.	Wear	Oil	Cont.	Wear	Oil	Cont.
			C	W	W	N	W	W	C	N	N
Lab ID Bottle ID Date Sampled Oil Hours (Kms) Unit Hours (Kms) Oil Change Oil Added (Liters) Filters Hours (Kms)			Test Method	Result	23102707		23102706		23102705		
					176446		176445		176444		
					21-Sep-23		09-Sep-23		31-Aug-23		
					200		100		20		
					220		120		20		
			0.1		0.1						
Wear Condition											
Wear Element	Method	Unit	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	Fine Wear (ICP-AES)	Coarse Wear (RFS-AES)	The New Oil (TNO)	Fine Wear (ICP)	Coarse Wear (RFS)
Iron	D-5185	PPM	100.7 C	26.1	42.4	16.2	63.1	53.6	0	>100	>200
Chromium	D-5185	PPM	3.8	0.7	1.9	0.0	3.4	1.9	0	>5	>15
Lead	D-5185	PPM	0.6	0.8	0.2	0.0	1.5	0.3	0	>20	>50
Copper	D-5185	PPM	6.4	0.5	3.5	0.0	11.0 C	3.2	0	>10	>25
Tin	D-5185	PPM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0	>10	>25
Aluminum	D-5185	PPM	13.9 C	1.3	7.7	0.0	9.1	0.0	0	>10	>20
Nickel	D-5185	PPM	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0	>5	>10
Silver	D-5185	PPM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0		
Molybdenum	D-5185	PPM	0.2	0.0	0.3	0.0	0.5	0.0	1		
Titanium	D-5185	PPM	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	0		
PQ Index	D-8184	Index		19		14		64		>15	>20
Oil Condition											
Viscosity @ 40°C	D-445	cSt							TNO	L-Warning	L-Caution
Viscosity @ 100°C	D-445	cSt	11.8 W		13.6		13.9		14.8	<12.5	<13.7
Oxidation	D-7414	Abs	27.3 W		15.5 W		5.2		4.0	>8	>9
Nitration	D-7624	Abs/cm	3.5		3.6		2.1		0.4	>10	>25
Acid Number	D-974	mg KOH/g							7.2	<2	<3.6
Base Number	D-4739	mg KOH/g	6.9		9.3		10.2				
Contamination											
Water	E-2412	% (WtL)	0.069		0.065		0.068		0.080		>0.15
Fuel	In-house	% (WtL)	1.4		0.10		0.10				>0.25
Glycol	E-2412	Abs	N/A		N/A		N/A				>2
Soot in Oil	E-2412	% (WtL)	0.60		0.50		0.39				>3
Soot Dispersion (100-2)	D7899M	Index	60		60		90				<50
Vanadium	D-5185	PPM	0		0		0		0		<30
Sodium	D-5185	PPM	1		1		3		4		
Silicon	D-5185	PPM	8.1	0.4	7.4	0.0	14.0	3.7	13	>25	>50
Potassium	D-8595	PPM	0.4		0.2		0.2				
Additive Element											
Boron	D-5185	PPM	0		1		2		3		
Magnesium	D-5185	PPM	488		604		874		816		
Calcium	D-5185	PPM	1281		1538		1766		2128		
Barium	D-5185	PPM	0		0		0		0		
Phosphorus	D-5185	PPM	531		681		809		1003		
Zinc	D-5185	PPM	716	161	861	183	961	174	1216		
Additional Test											
Flash Point	D-3828	°C							TNO	L-Warning	L-Caution
Viscosity Index	D-2270										

Note: Alarm Limits are variable and dependent upon dataset size and to be used as general guideline.

No Sign or N : NORMAL, C or W : CAUTION (first level warning limit), W or W : Warning (second level warning limit)

Accuracy of interpretation and recommendation are based on representatives sample and information supplied.

No warranty is expressed or implied for this report.

ภาคผนวก ซ

ค่าน้ำหนักและระยะห่างของช่องว่างชั้นส่วนในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล



ENGINE COMPONENTS MEASUREMENT RECORD

FUEL: _____ Diesel _____

Pre-measurement Date: _____ 17/03/66 _____

Testing Beginning Date: _____ 16/03/66 _____

Testing Ending Date: _____ 05/04/66 _____

Total Running Hours: _____ 220 _____ Hour _____

หน่วยที่ใช้:

ความยาว = มิลลิเมตร

น้ำหนัก = กรัม

Table 1 Cylinder Measurement

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	22	61
After-Measurement	22	62

	Bore gauge set (mm)	Micrometer set (mm)
Before	0.932	88
After	0.934	88



Component	Measuring	No. Piston	Position	Perpend.				Parallel				diameter liner		
				ครึ่งที่			AVG.	ครึ่งที่			AVG.	Perpend.	Parallel	AVG
				1	2	3		1	2	3				
Liner	Before test	1	TOP	0.969	0.97	0.969	0.969	0.96	0.96	0.959	0.960	87.963	87.972	87.968
			Middle	0.966	0.969	0.968	0.968	0.961	0.962	0.963	0.962	87.964	87.970	87.967
			Bottom	0.964	0.964	0.964	0.964	0.961	0.961	0.96	0.961	87.968	87.971	87.970
	After test	1	TOP	0.961	0.96	0.961	0.961	0.951	0.95	0.951	0.951	87.973	87.983	87.978
			Middle	0.971	0.971	0.971	0.971	0.951	0.951	0.95	0.951	87.963	87.983	87.973
			Bottom	0.967	0.967	0.966	0.967	0.954	0.954	0.954	0.954	87.967	87.980	87.974

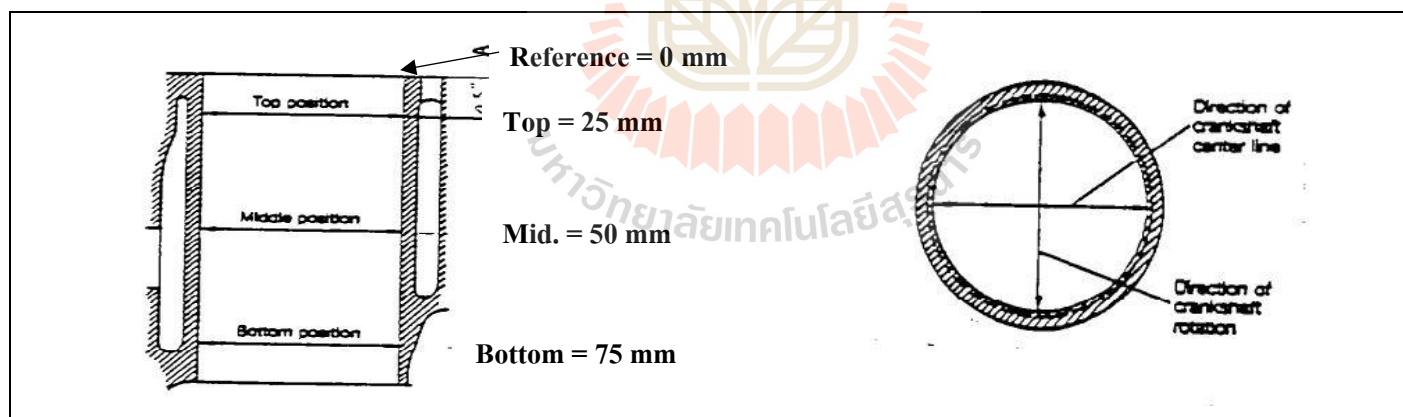
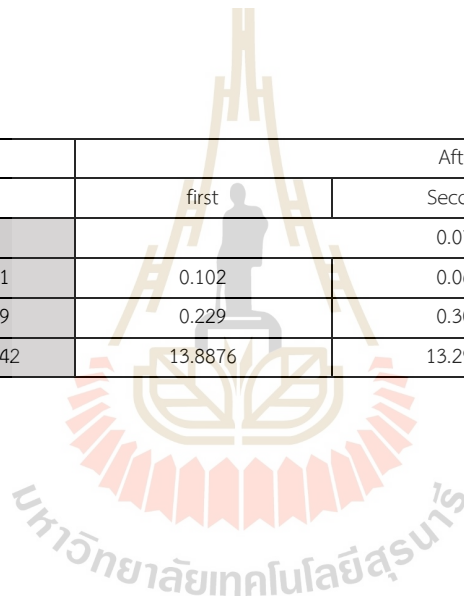


Table 2 Rings Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	21	60
After-Measurement	21	60

	Before			After		
Position	first	Second	Oil	first	Second	Oil
Piston Clearance	0.038			0.076		
Ring Clearance	0.102	0.064	0.051	0.102	0.064	0.051
Gap (@75mm)	0.203	0.229	0.229	0.229	0.305	0.305
Weight	13.9122	13.285	12.6742	13.8876	13.2998	12.6496



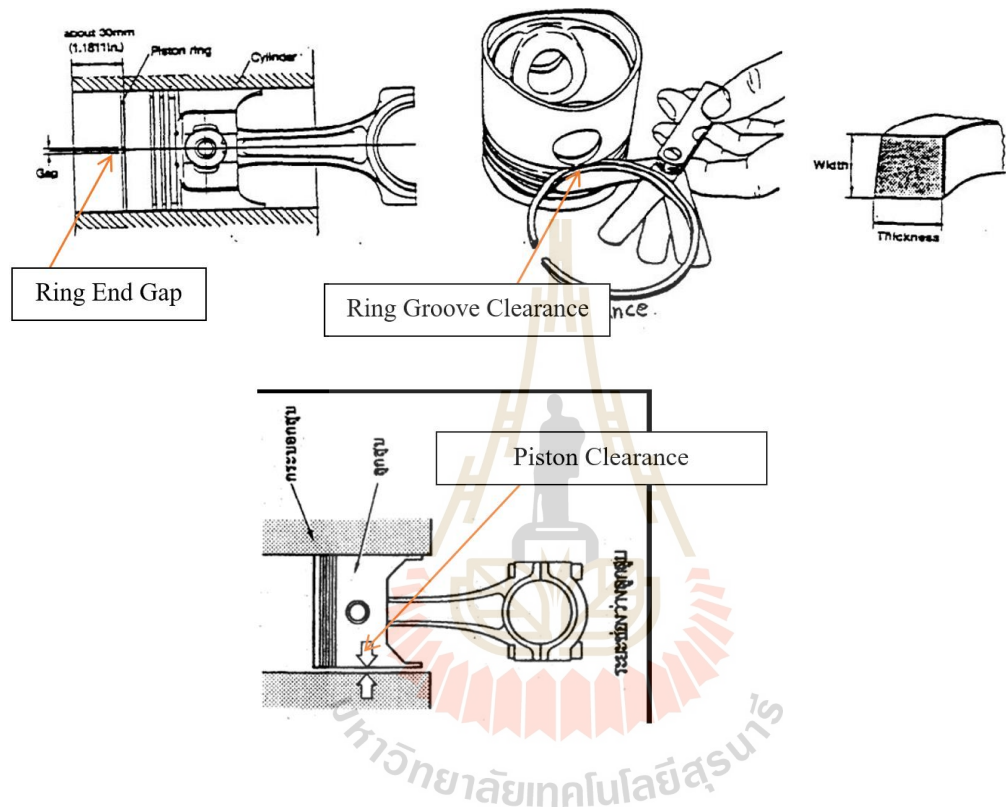


Table 3 Piston Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	21	62
After-Measurement	21	62

Before					
Cylinder		time			Avg
		1	2	3	
1	Measure	87.902	87.939	87.939	87.92667
	Weight	442.38			

After					
Cylinder		time			Avg
		1	2	3	
1	Measure	87.894	87.912	87.916	87.907
	Weight	441.77			

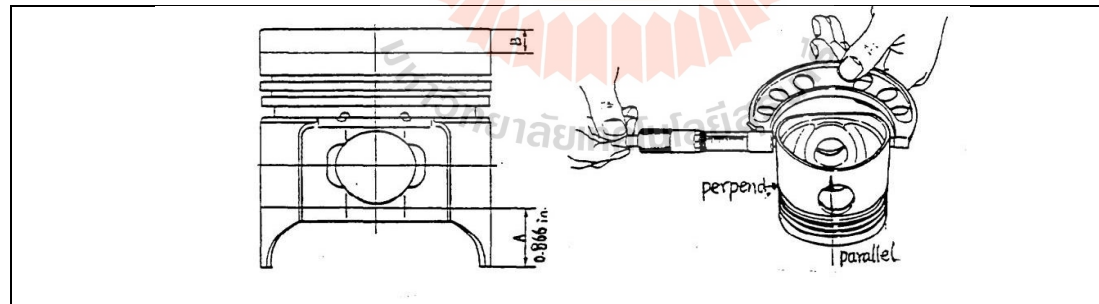


Table 4 Piston Pin Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	21	62
After-Measurement	21	62

Cylinder	position	before		After	
		Parallel	Perpend.	Parallel	Perpend.
1	Side R.	23.001	23.002	22.991	22.998
	Side L.	22.998	22.999	22.992	22.999
	middle	22.994	22.993	22.99	22.99
	Weight	178.4646		178.3868	

Schematic:

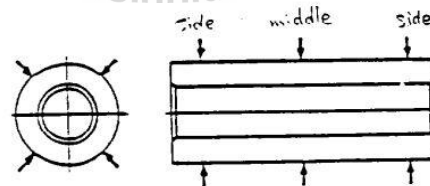


Table 5 Gap Valve

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	20	70
After-Measurement	20	70

Cylinder	Positon	Intake valve			Exhaust Valve			Intake valve			Exhaust Valve		
		จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด		
		1	2	avg.	1	2	avg.	1	2	avg.	1	2	avg.
1	Top	6.959	6.961	6.96	6.949	6.95	6.9495	6.959	6.961	6.96	6.949	6.95	6.9495
	Middle	6.963	6.963	6.963	6.951	6.95	6.9505	6.963	6.963	6.963	6.951	6.95	6.9505
	bottom	6.964	6.963	6.9635	6.83	6.828	6.829	6.964	6.963	6.9635	6.83	6.828	6.829
	Head dia.	94.4			94.4			94.4			94.4		
	High	N/A			N/A			N/A			N/A		
	Weight	59.4559			51.1987			51.1987			51.1899		

		Before			After		
Vlave Tappet		Intake valve			Exhaust Valve		
1	Size avg.(T,M,B)	6.96			6.966		
	Weight	23.5411			27.2002		

ภาคผนวก ณ

ค่าน้ำหนักและระยะห่างของช่องว่างชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ENGINE COMPONENTS MEASUREMENT RECORD

FUEL: _____ BHD _____

Pre-measurement Date: _____ 31/03/66 _____

Testing Beginning Date: _____ 01/04/66 _____

Testing Ending Date: _____ 21/04/66 _____

Total Running Hours: _____ 220 hour _____

หน่วยที่ใช้:

ความยาว = มิลลิเมตร

น้ำหนัก = กรัม

Table 1 Cylinder Measurement

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	22	55
After-Measurement	22	55

	Bore gauge set (mm)	Micrometer set (mm)
Before	0.933	88
After	0.932	88



Component	Measuring	No. Piston	Position	Perpend.				Parallel				diameter liner		
				ครั้งที่			AVG.	ครั้งที่			AVG.	Perpend.	Parallel	
				1	2	3		1	2	3				
Liner	Before test	1	TOP	0.938	0.936	0.936	0.937	0.928	0.927	0.927	0.927	87.996	88.006	88.001
			Middle	0.942	0.941	0.941	0.941	0.939	0.938	0.938	0.938	87.992	87.995	87.993
			Bottom	0.938	0.938	0.938	0.938	0.941	0.941	0.941	0.941	87.995	87.992	87.994
	After test	1	TOP	0.928	0.928	0.927	0.928	0.907	0.908	0.907	0.907	88.004	88.025	88.015
			Middle	0.936	0.935	0.935	0.935	0.925	0.926	0.925	0.925	87.997	88.007	88.002
			Bottom	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	87.997	87.997	87.997

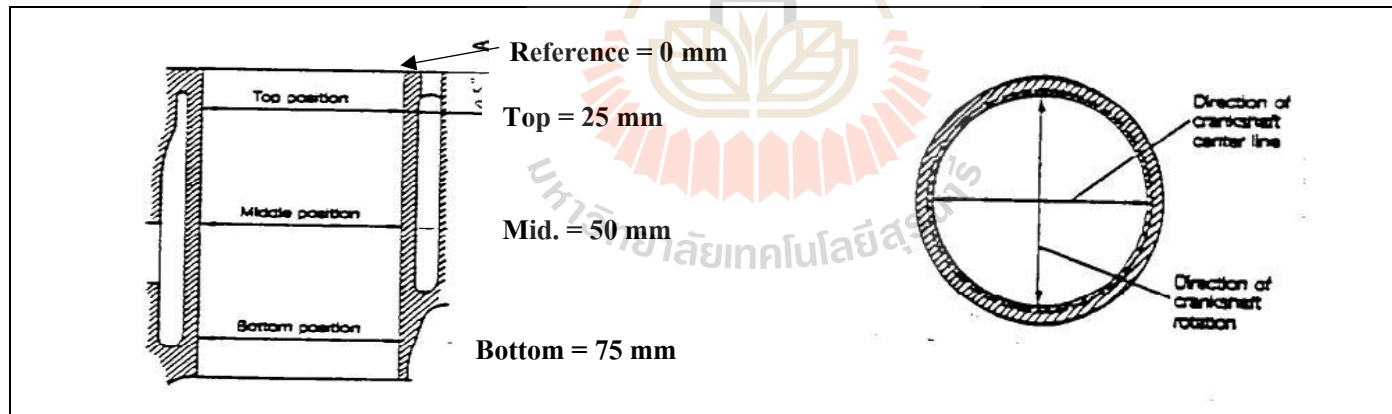


Table 2 Rings Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	21	60
After-Measurement	21	60

	Before			After		
Position	first	Second	Oil	first	Second	Oil
Piston Clearance	0.076			0.102		
Ring Clearance	0.102	0.064	0.051	0.102	0.064	0.051
Gap (@75mm)	0.254	0.279	0.305	0.33	0.356	0.356
Weight	13.9125	13.2993	12.8513	13.8835	13.2717	12.8353

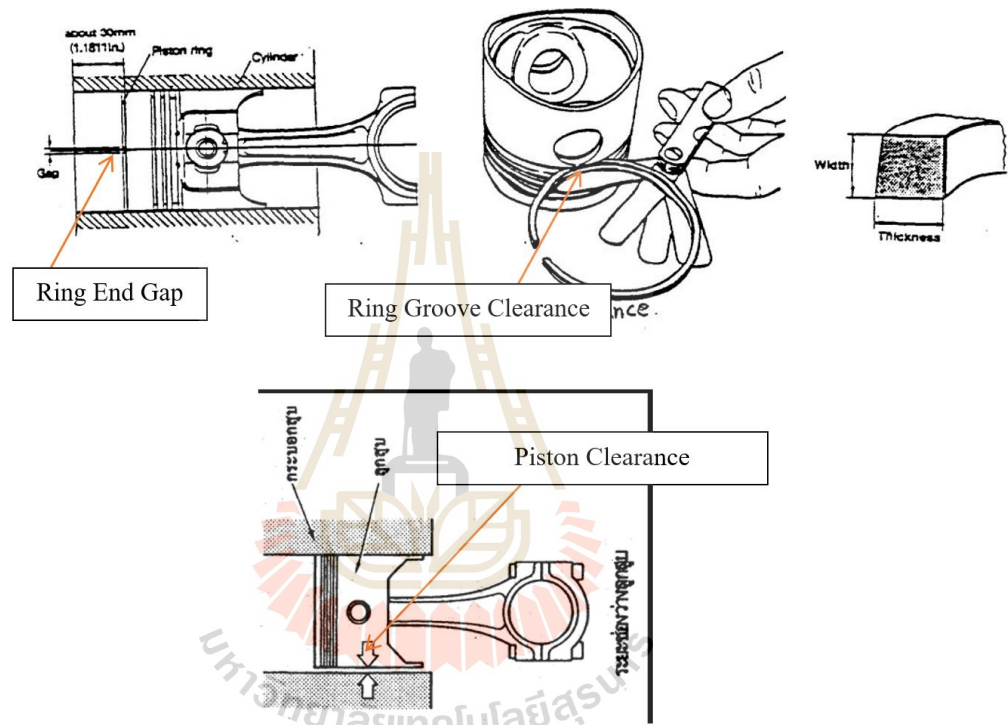


Table 3 Piston Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	22	62
After-Measurement	22	62

Before					
Cylinder		time			Avg
		1	2	3	
1	Measure	87.931	87.925	87.913	87.923
	Weight	442.72			

After					
Cylinder		time			Avg
		1	2	3	
1	Measure	87.9	87.899	87.8975	87.899
	Weight	441.77			

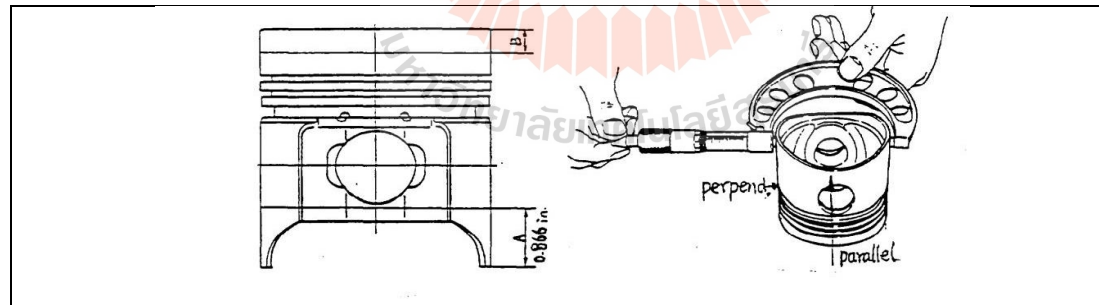


Table 4 Piston Pin Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	20	59
After-Measurement	20	59

Cylinder	position	before		After	
		Parallel	Perpend.	Parallel	Perpend.
1	Side R.	23.001	23.002	22.997	22.993
	Side L.	22.998	22.999	22.997	22.995
	middle	22.994	22.993	22.99	22.984
	Weight	178.3868		178.3647	

Schematic:

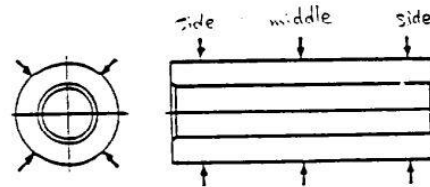


Table 5 Gap Valve

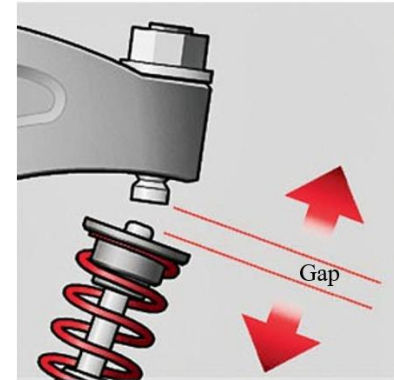
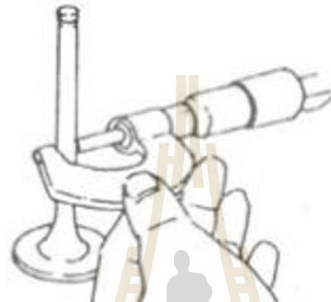
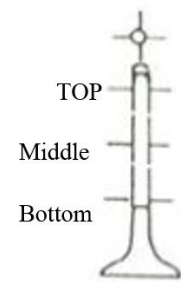
NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	20	63
After-Measurement	20	62

Cylinder	Positon	Intake valve			Exhaust Valve			Intake valve			Exhaust Valve		
		จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด		
		1	2	avg.	1	2	avg.	1	2	avg.	1	2	avg.
1	Top	6.956	6.957	6.9565	6.949	6.949	6.949	6.956	6.957	6.9565	6.949	6.949	6.949
	Middle	6.959	6.96	6.9595	6.95	6.95	6.95	6.959	6.96	6.9595	6.95	6.95	6.95
	bottom	6.958	6.958	6.958	6.813	6.812	6.8125	6.958	6.958	6.958	6.813	6.812	6.8125
	Weight	58.9966			51.0154			58.9988			51.0098		

		Before			After		
Vlave Tappet		Intake valve			Exhaust Valve		
1	Size avg.(T,M,B)	6.9635			6.967		
	Weight	27.4689			27.2997		

After-measurement: ___ 30 °C ___



ภาคผนวก ญ

ค่าน้ำหนักและระยะห่างของช่องว่างชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน BHD90

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ENGINE COMPONENTS MEASUREMENT RECORD

FUEL: _____ BHD90 _____

Pre-measurement Date: _____ 01/05/66 _____

Testing Beginning Date: _____ 02/05/66 _____

Testing Ending Date: _____ 23/05/66 _____

Total Running Hours: _____ 220 hour _____

หน่วยที่ใช้:

ความยาว = มิลลิเมตร

น้ำหนัก = กรัม

Table 1 Cylinder Measurement

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	22	45
After-Measurement	22	46

	Bore gauge set (mm)	Micrometer set (mm)
Before	0.932	88
After	0.932	88



Component	Measuring	No. Piston	Position	Perpend.				Parallel				diameter liner		
				ครั้งที่			AVG.	ครั้งที่			AVG.	Perpend.	Parallel	AVG
				1	2	3		1	2	3				
Liner	Before test	1	TOP	0.957	0.956	0.956	0.956	0.949	0.948	0.95	0.949	87.976	87.983	87.979
			Middle	0.96	0.959	0.959	0.959	0.958	0.959	0.959	0.959	87.973	87.973	87.973
			Bottom	0.955	0.955	0.955	0.955	0.961	0.96	0.96	0.960	87.977	87.972	87.974
	After test	1	TOP	0.953	0.951	0.951	0.952	0.945	0.945	0.944	0.945	87.980	87.987	87.984
			Middle	0.961	0.96	0.96	0.960	0.951	0.952	0.951	0.951	87.972	87.981	87.976
			Bottom	0.955	0.955	0.955	0.955	0.956	0.956	0.956	0.956	87.977	87.976	87.977

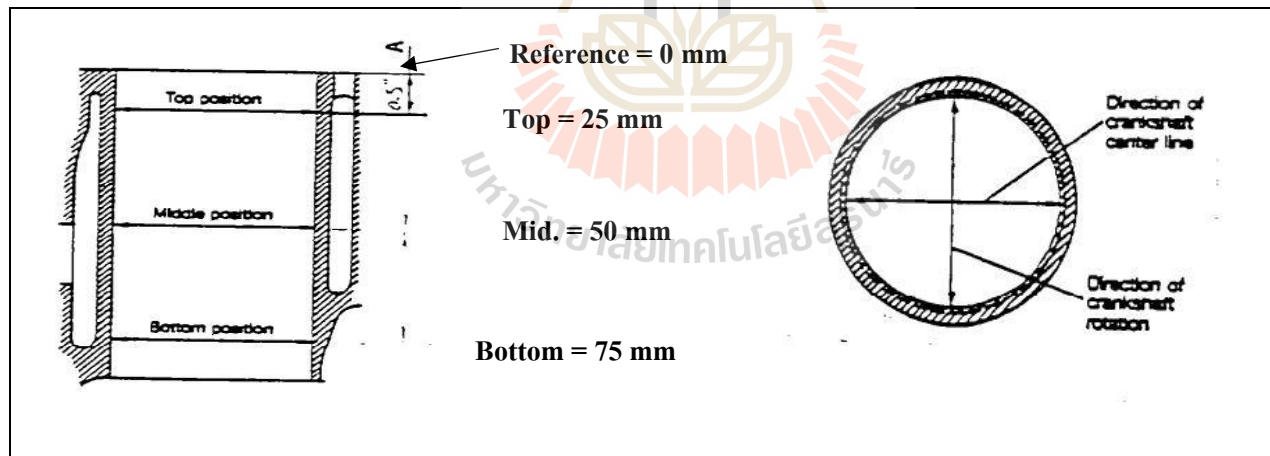
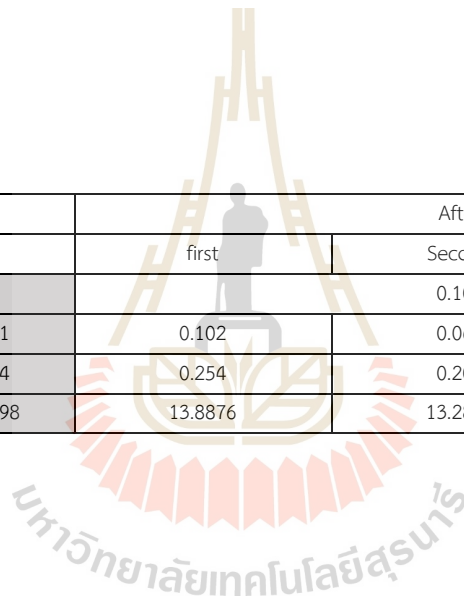


Table 2 Rings Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	21	62
After-Measurement	21	62

	Before			After		
Position	first	Second	Oil	first	Second	Oil
Piston Clearance	0.076			0.102		
Ring Clearance	0.076	0.064	0.051	0.102	0.064	0.051
Gap (@75mm)	0.229	0.127	0.254	0.254	0.203	0.279
Weight	13.9122	13.2998	13.2698	13.8876	13.2850	13.2487



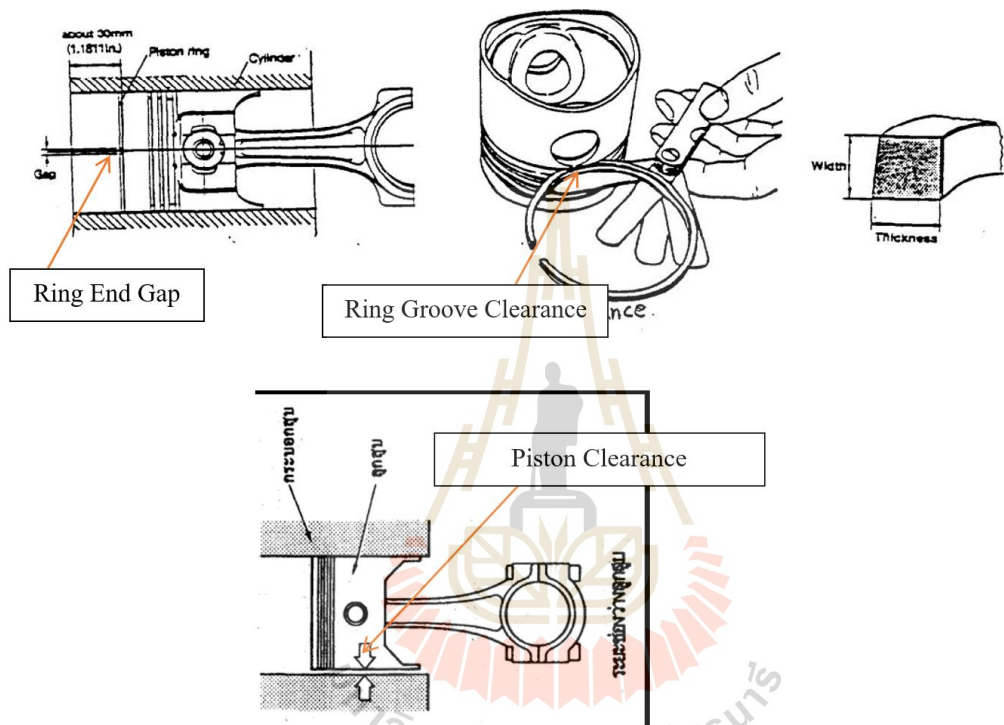


Table 3 Piston Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	21	62
After-Measurement	21	62

Before					
Cylinder		time			Avg
		1	2	3	
1	Measure	87.9265	87.9255	87.9285	87.92683
	Weight	442.26			

After					
Cylinder		time			Avg
		1	2	3	
1	Measure	87.92	87.911	87.907	87.913
	Weight	441.5			

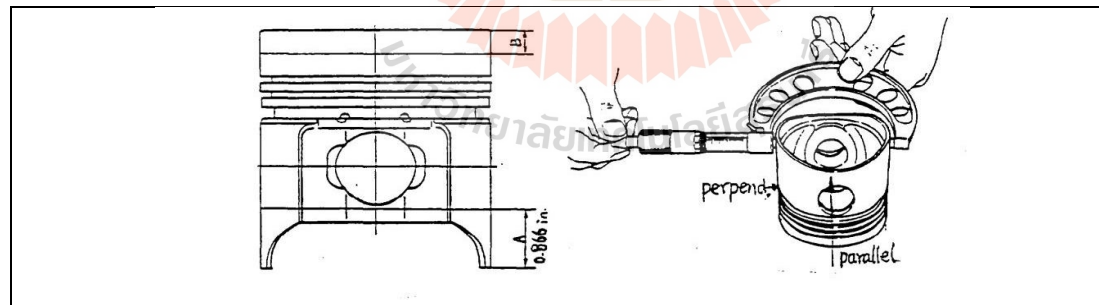


Table 4 Piston Pin Measurements

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	21	62
After-Measurement	21	62

Cylinder	position	before		After	
		Parallel	Perpend.	Parallel	Perpend.
1	Side R.	22.997	22.993	22.996	22.995
	Side L.	22.997	22.995	22.989	22.988
	middle	22.987	22.984	22.982	22.992
	Weight	178.4646		178.4599	

Schematic:

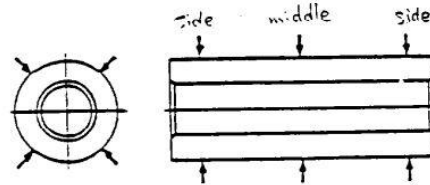


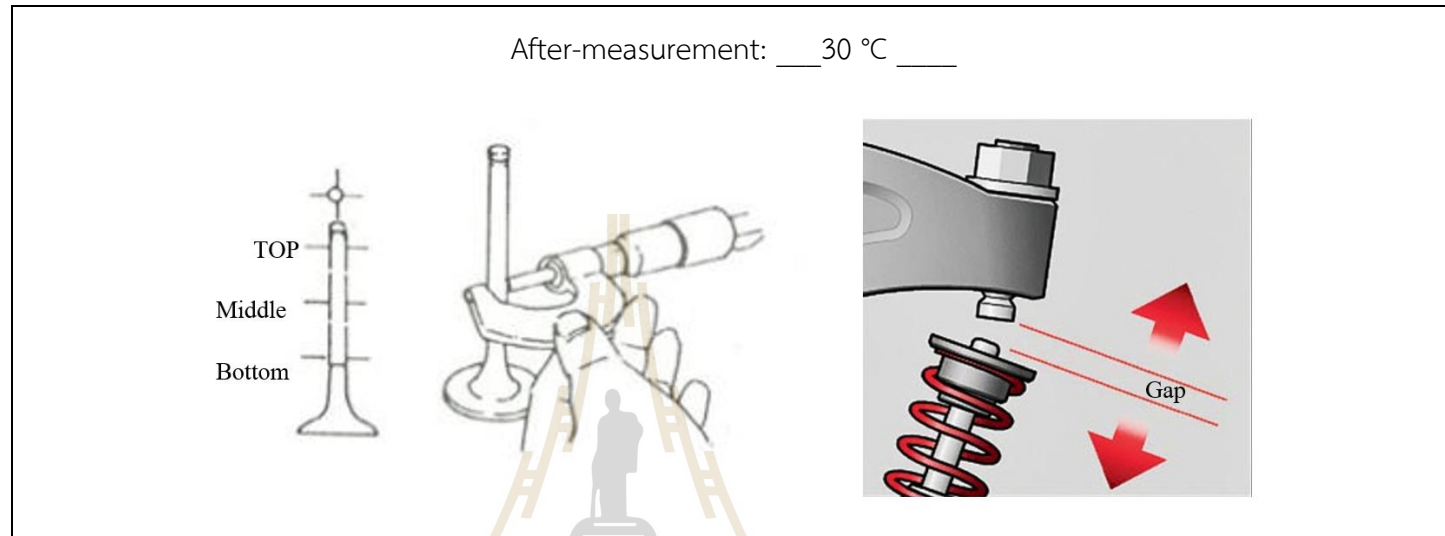
Table 5 Gap Valve

NOTE: Measurement Environment Temperature.

	Temperature (C)	RH (%)
Pre-Measurement	20	63
After-Measurement	20	62

Cylinder	Positon	Intake valve			Exhaust Valve			Intake valve			Exhaust Valve		
		จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด			จำนวนครั้งการวัด		
		1	2	avg.	1	2	avg.	1	2	avg.	1	2	avg.
1	Top	6.962	6.963	6.9625	6.951	6.951	6.951	6.962	6.963	6.9625	6.951	6.951	6.951
	Middle	6.97	6.97	6.97	6.954	6.953	6.9535	6.97	6.97	6.97	6.954	6.953	6.9535
	bottom	6.97	6.97	6.97	6.954	6.954	6.954	6.97	6.97	6.97	6.954	6.954	6.954
	Weight	58.412			51.0964			58.4122			51.0976		

		Before			After		
Vlave Tappet		Intake valve			Exhaust Valve		
1	Size avg.(T,M,B)	6.963			6.962		
	Weight	27.3545			27.1752		





ตารางที่ ฎ.1 ตัวแปรการคำนวณหาการสูญเสียหลัก

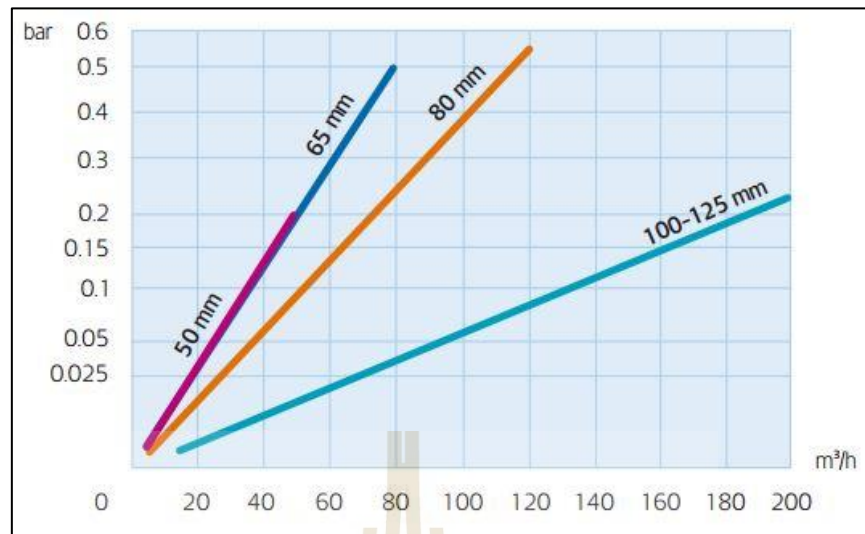
Calculate Major Loss				
Density (kg/m ³) @ 30 °C		995.7	Duct L. (m)	7.19
ϵ (m)		0.000152	Duct dia. (m)	0.08
Dynamic Vis.= (Ns/m ²)		0.000798	Duct A. (m ²)	0.005027
Flow rate (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	H _{major} (m)
0.0126	2.5144	250988.97	0.0238	0.6894
0.0124	2.4592	245472.73	0.0238	0.6598
0.0117	2.3210	231682.13	0.0239	0.5887
0.0110	2.1829	217891.53	0.0239	0.5216
0.0101	2.0171	201342.80	0.0240	0.4465
0.0093	1.8458	184242.46	0.0240	0.3750
0.0081	1.6192	161625.87	0.0241	0.2900
0.0070	1.3926	139009.28	0.0243	0.2159
0.0055	1.0887	108669.95	0.0246	0.1335
0.0041	0.8068	80537.12	0.0250	0.0747
0.0021	0.4255	42475.06	0.0265	0.0220
0.0010	0.1989	19858.47	0.0293	0.0053
0	0	0	0.0232	0

ตารางที่ ฎ.2 ตัวแปรการคำนวณหาการสูญเสียรอง

Calculate Minor Loss		
Density (kg/m ³) @30 °C		995.7
Duct dia. (m)		0.08
Duct A. (m ²)		0.005027
Flow rate (m ³ /s)	V (m/s)	H _{major} (m)
0.0126	2.5144	1.4243
0.0124	2.4592	1.3624
0.0117	2.3210	1.2136
0.0110	2.1829	1.0734
0.0101	2.0171	0.9166
0.0093	1.8458	0.7675
0.0081	1.6192	0.5906
0.0070	1.3926	0.4369
0.0055	1.0887	0.2670
0.0041	0.8068	0.1467
0.0021	0.4255	0.0408
0.0010	0.1989	0.0089
0	0	0

ตารางที่ ฎ.3 ค่า K Value ของอุปกรณ์สวมต่อต่าง ๆ

Fitting	K
sharp entrance	0.5
90 °standard elbow 4 ตัว	2.16
Coupling and Union 2 ชุด	0.096
sharp exit	1
gate vale 2 ตัว ¼ open	48
K total	51.756
Flow meter	แสดงดังรูปที่ ฎ.1



รูปที่ ๑.1 เส้นกราฟการสูญเสียของเครื่องวัดอัตราการไหลขนาดต่าง ๆ



ภาคผนวก ง

การเขียนโปรแกรมแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์และการหาค่าที่เหมาะสม



Heat map

```

In [2]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

In [3]: Path = r"D:\ป.เอก\Thesis Doctor\Performance Emission and Combusion BHD\Old result\BHD
Raw = pd.read_excel(Path,sheet_name= 'Without Diesel') #อ่าน tab 'Without Diesel'
Data = Raw.copy() #Copy ข้อมูล Without Diesel ในตัวแปลที่ชื่อ "Data"
Data = Data.drop(["Replicate", "Index"], axis=1) #ลบ column Replicate และ Index ออก,
print (Data.tail()) # .tail คือการแสดงผลลัพธ์ 5 แถวสุดท้ายของข้อมูล

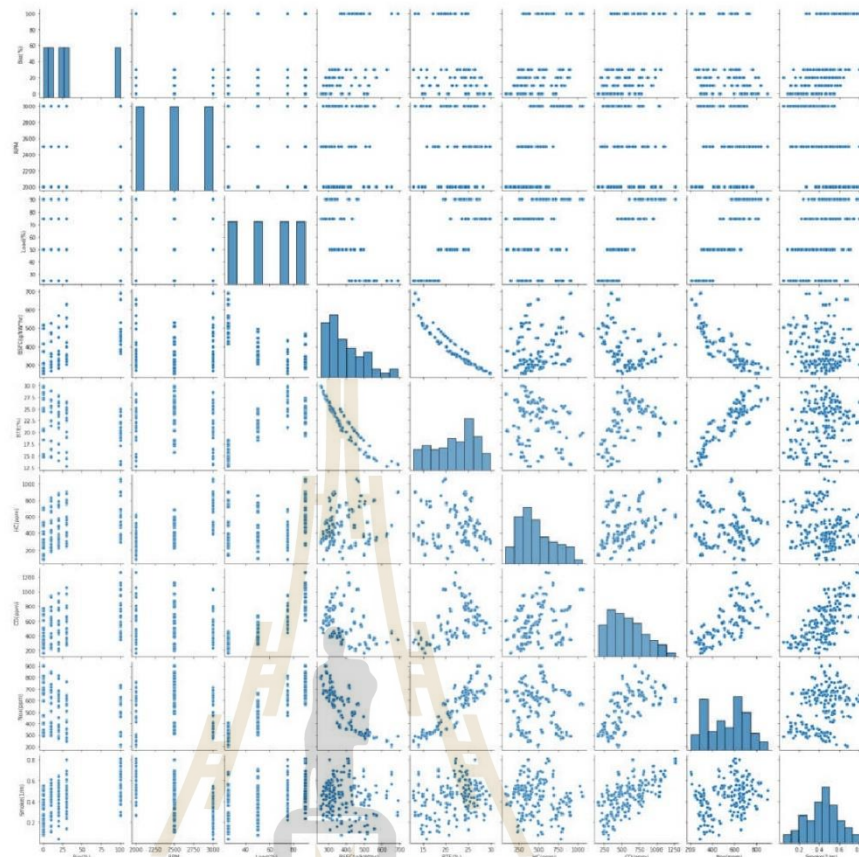
      Bio(%)   RPM  Load(%)  BSFC(g/kw*hr)  BTE(%)  HC(ppm)  CO(ppm)  Nox(ppm)  \
175      30  2500      90      317.80      25.29  557.84  975.97  766.39
176      30  3000      25      556.61      14.44  802.49  366.77  274.66
177      30  3000      50      399.20      20.13  773.99  451.25  359.63
178      30  3000      75      321.83      24.97  502.88  590.70  562.54
179      30  3000      90      333.60      24.09  885.21  782.56  641.31

      Smoke(1/m)
175          0.61
176          0.14
177          0.34
178          0.31
179          0.43

In [4]: import seaborn as sns
sns.pairplot(Data)

Out[4]: <seaborn.axisgrid.PairGrid at 0x17a1ea21430>

```

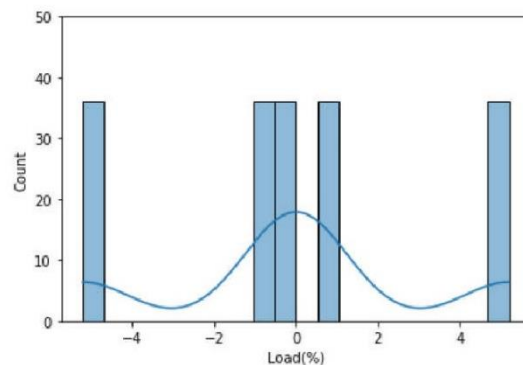


```
In [5]: from sklearn import preprocessing
quantile_transformer = preprocessing.QuantileTransformer(output_distribution='normal')
Data["Load(%)"] = quantile_transformer.fit_transform(np.array(Data["Bio(%)"]).reshape(-1,1))
#Data["Load"] คือ ตัวแปร Load ในข้อมูล Data ให้ทำการ fit transform
#reshape(-1,1) คือการเติมมิติให้ด้านคอลัมน์ (-1) เป็นการเว้นว่าง หรือไม่เติมแต่จะใส่ 0 ไม่ได้
sns.histplot(Data, x=Data["Load(%)"], kde=True, bins=20) #กำหนดแกน X เป็นข้อมูล Load
plt.ylim(0, 50)
```

C:\Users\niti\anaconda3\lib\site-packages\sklearn\preprocessing_data.py:2612: UserWarning: n_quantiles (1000) is greater than the total number of samples (180). n_quantiles is set to n_samples.

warnings.warn("n_quantiles (%s) is greater than the total number "

Out[5]: (0.0, 50.0)



```
In [6]: Input = Data.loc[:, ['Bio(%)', 'RPM', 'Load(%)']] #.loc คือการเลือก row หรือ column โดยกา
Output = Data.drop(Input.columns, axis =1) #วางข้อมูลในแนว column(axis=1) และ Input.co
print (Output)
sCor = Data.corr()
print('\nSCORE:')
print(sCor) #แปลงจากค่าดิบให้เป็นคะแนนจาก 0 ถึง 1 (ค่าน้อยสุด=0, ค่ามากที่สุด=1)
```

	BSFC(g/kW*hr)	BTE(%)	HC(ppm)	CO(ppm)	Nox(ppm)	Smoke(1/m)
0	498.19	15.37	150.79	165.92	305.03	0.393
1	374.80	20.43	101.15	352.90	601.33	0.379
2	271.42	28.21	81.40	594.79	687.66	0.474
3	304.12	25.18	280.17	748.32	760.18	0.520
4	415.82	18.41	230.83	246.06	396.51	0.160
..	...	...	...	...	...	...
175	317.80	25.29	557.84	975.97	766.39	0.610
176	556.61	14.44	802.49	366.77	274.66	0.140
177	399.20	20.13	773.99	451.25	359.63	0.340
178	321.83	24.97	502.88	590.70	562.54	0.310
179	333.60	24.09	885.21	782.56	641.31	0.430

[180 rows x 6 columns]

SCORE:

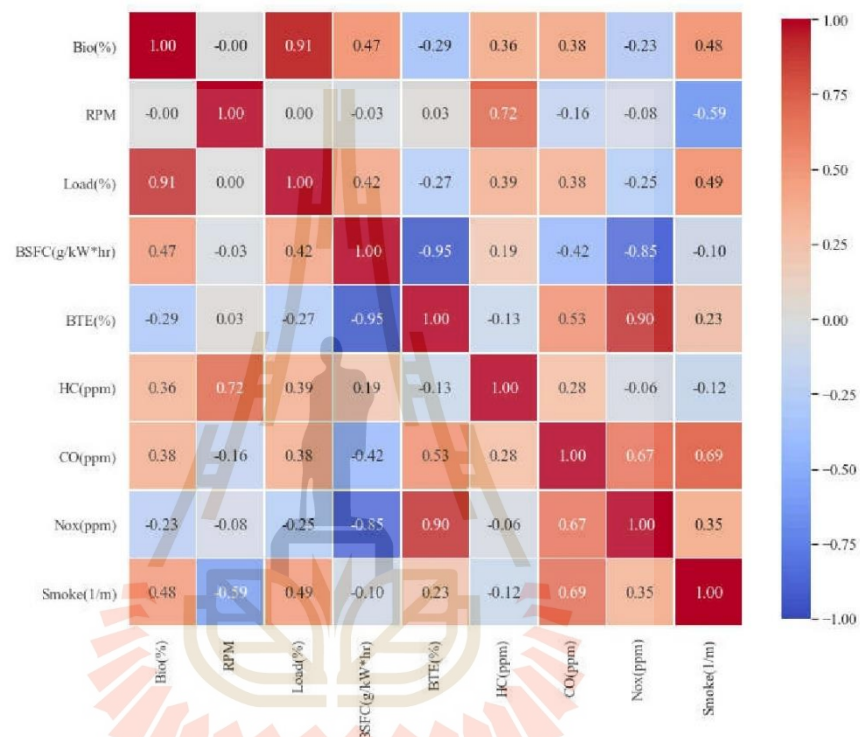
	Bio(%)	RPM	Load(%)	BSFC(g/kW*hr)	\
Bio(%)	1.000000e+00	-1.564976e-16	9.057461e-01	0.473013	
RPM	-1.564976e-16	1.000000e+00	2.195247e-16	-0.030363	
Load(%)	9.057461e-01	2.195247e-16	1.000000e+00	0.423425	
BSFC(g/kW*hr)	4.730129e-01	-3.036298e-02	4.234253e-01	1.000000	
BTE(%)	-2.881505e-01	2.562591e-02	-2.666600e-01	-0.953597	
HC(ppm)	3.580838e-01	7.175793e-01	3.868096e-01	0.189289	
CO(ppm)	3.760522e-01	-1.601103e-01	3.795830e-01	-0.417596	
Nox(ppm)	-2.274473e-01	-7.899322e-02	-2.533276e-01	-0.849135	
Smoke(1/m)	4.808753e-01	-5.869469e-01	4.908532e-01	-0.099599	

	BTE(%)	HC(ppm)	CO(ppm)	Nox(ppm)	Smoke(1/m)
Bio(%)	-0.288151	0.358084	0.376052	-0.227447	0.480875
RPM	0.025626	0.717579	-0.160110	-0.078993	-0.586947
Load(%)	-0.266660	0.386810	0.379583	-0.253328	0.490853
BSFC(g/kW*hr)	-0.953597	0.189289	-0.417596	-0.849135	-0.099599
BTE(%)	1.000000	-0.128863	0.526409	0.902110	0.230973
HC(ppm)	-0.128863	1.000000	0.283750	-0.059832	-0.124079
CO(ppm)	0.526409	0.283750	1.000000	0.671306	0.692839
Nox(ppm)	0.902110	-0.059832	0.671306	1.000000	0.345880
Smoke(1/m)	0.230973	-0.124079	0.692839	0.345880	1.000000

```
In [7]: sns.set(style = "white", font = "Times New Roman", font_scale=1.2)
sCor = Data.corr()
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 12))
```

```
sns.heatmap(data=sCor,
             annot=True,
             cmap= 'coolwarm',
             square=True,
             annot_kws={'size': 'medium', 'alpha': 1},
             linewidths=0.5,
             cbar_kws={"shrink": 0.8},
             fmt=',.2f',
             vmin=-1,
             vmax=1)

plt.savefig("Heat_map.jpeg", transparent=True, dpi = 600)
```



In [8]: `***ต้องรันผล ANOVA ก่อนค่อยมารัน Code นี้`
`Data_2 = pd.read_excel(r"D:\ป.เอก\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Excel\ANOVA.xlsx`
`print (Data_2.head(3))`

	BHD	RPM	Load	BHD•RPM	BHD•Load	RPM•Load	BHD•RPM•Load	BSFC	BTE	\
Index										
BHD	1	1	1	1.0	1.0	1.0	1	0	0	
RPM	1	1	1	1.0	1.0	1.0	1	0	0	
Load	1	1	1	1.0	1.0	1.0	1	0	0	

	HC	CO	NOx	Smoke
Index				
BHD	0	0	0	0.0
RPM	0	0	0	0.0
Load	0	0	0	0.0

Create GRNN Model

```
In [1]: #Import related libraty
#รวม Code Step 1 กับ 2 เข้าด้วยกัน
import pandas as pd
import numpy as np
import seaborn as sns #ใช้ plot กราฟ
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.utils import shuffle as sf
```

```
In [2]: Raw = pd.read_excel(r'D:\ป.เอก\Thesis Doctor\Performance Emission and Combusion BHD\
index_col="Index")
Raw = Raw.drop('Replicate', axis=1) #ตัด column Replicate ใน Excel ที่
#Data['Smoke'] = np.Log(Data['Smoke']) #ไม่ได้ใช้
```

```
In [3]: #ขั้นตอนการ Copy ข้อมูลเก็บไว้
Data = Raw.copy() #Copy ข้อมูลที่ชื่อ RAW ไว้ในตัวแปร Data เพื่อป้องกันการดัดแปลงแก้ไขในไฟล์ Excel
Data = sf(Data, random_state=5) #random_state=42 เป็นการให้โปรแกรม Random ข้อมูลแค่ 1 ครั้ง
#random_state=5 เป็นข้อมูลอีกชุดหนึ่ง
#random_state=100เป็นข้อมูลอีกชุดหนึ่ง แต่ละตัวเลข จะสุ่มไม่เหมือน
print (Data.head(5)) #แสดงตัวอย่างข้อมูลมา 5 ชุด
```

Index	Bio(%)	RPM	Load(%)	BSFC(g/kw*hr)	BTE(%)	HC(ppm)	CO(ppm)	\
87	0	2000	75	271.17	28.23	82.43	614.79	
176	100	2500	90	412.34	22.04	678.86	1090.02	
34	100	3000	50	482.23	18.84	854.15	525.55	
38	10	2000	50	363.11	21.42	188.80	410.08	
96	0	3000	90	309.62	24.73	687.27	602.22	

Index	Nox(ppm)	Smoke(1/m)
87	681.35	0.470
176	733.28	0.660
34	302.41	0.382
38	511.18	0.492
96	685.52	0.330

```
In [4]: #Define input and output
Input = Data.loc[:,['Bio(%)', 'RPM', 'Load(%)']] #กำหนดค่าให้ Column ไหนเป็น INPUT (ตัวที่)
Output = Data.drop(Input.columns, axis=1) # Column ที่นอกเหนือจาก input ให้เป็น Output (ตัวที่)
print (Output.head(5)) #แสดงตัวอย่างมา 5 ตัว
```

Index	BSFC(g/kw*hr)	BTE(%)	HC(ppm)	CO(ppm)	Nox(ppm)	Smoke(1/m)
87	271.17	28.23	82.43	614.79	681.35	0.470
176	412.34	22.04	678.86	1090.02	733.28	0.660
34	482.23	18.84	854.15	525.55	302.41	0.382
38	363.11	21.42	188.80	410.08	511.18	0.492
96	309.62	24.73	687.27	602.22	685.52	0.330

```
In [5]: #define train and test set ขั้นตอนการแบ่งข้อมูล Train and Test data set
from sklearn.model_selection import train_test_split as tts #ใช้ SkLearn ในการแบ่งข้อมูล

X_train, X_test, y_train, y_test = tts(Input, Output, test_size=0.2, random_state=5)

print ("Train size: ", len(X_train.index))
print ("Test size: ", len(X_test.index))

print (y_train)
```

```

Train size: 144
Test size: 36
      BSFC(g/kW*hr)  BTE(%)  HC(ppm)  CO(ppm)  Nox(ppm)  Smoke(1/m)
Index
204          324.66   24.35   863.56   755.37   651.69     0.450
207          328.28   24.48   304.19   813.55   605.80     0.510
182          362.83   21.44   180.35   387.23   506.61     0.470
175          372.49   24.39   541.41   817.75   628.23     0.680
94           370.64   20.66   490.88   312.69   464.07     0.210
...          ...      ...      ...      ...      ...      ...
70           399.21   20.13   752.87   447.13   348.20     0.298
114          319.58   24.34   346.90   437.48   582.34     0.270
93           517.76   14.79   543.74   235.31   327.08     0.090
163          257.71   29.71   331.07   510.70   813.52     0.460
164          282.87   27.07   534.12   693.23   899.02     0.420

```

[144 rows x 6 columns]

```

In [6]: #พอแบ่งข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะเริ่มทำการ Train model GRNN
        #Define GRNNs เรียกใช้ AI GRNN

        from pyGRNN import GRNN #เรียกใช้ Library GRNN *ต้องติดตั้งใน Anaconda prompt ก่อน โดยพิมพ์
        from sklearn.multioutput import MultiOutputRegressor #ปกติ Library pyGRNN ถูกออกแบบมา
        #แต่ปัญหาที่เราหาเป็นแบบ multi-output เลยต้องเพิ่ม Library MultiOutputRegressor เข้ามาช่วยแทน

        algorithm = GRNN(n_restarts_optimizer=4, calibration='warm_start') #ไม่มี seed=5 เนื่องจาก
        #พารามิเตอร์ในแบบจำลอง GRNN ที่ใช้ในการปรับค่าคือค่า Sigma(ตามสมการ GRNN) ซึ่งเราจะทำการ Optimize
        #ใน Library pyGRNN ทำ Optimization ค่า Sigma โดยใช้ค่าสิ่ง Calibration
        #Optimization ค่า Sigma โดยใช้ Algorithm ที่ชื่อว่า Genetic Algorithm(GA) โดยแทนค่าสิ่งว่า 'warm_start'
        #สนใจ Library นี้ถูกกำหนดไว้แล้วว่า GA ถูกทำซ้ำ 50 รอบ (ถูกแบ่ง Gen ไว้ 50 Gen??) อ้อ อาร์มบอกใช้ GA
        #เพื่อความมั่นใจเราเลยกำหนดให้ทำซ้ำเพิ่มอีก 4 รอบ ในค่าสิ่ง N_restart_optimizer=4

        model_GRNN = MultiOutputRegressor(algorithm, n_jobs=4) #n_jobs=4 คือเรียกใช้ CPU ทั้ง 4 core
        model_GRNN.fit(X_train,y_train) #คำสั่ง Fit=train โดยใช้ข้อมูล X_train, y_train
        #ในไฟล์ STEP2 Create GRNN_model คำสั่ง model_GRNN.fit(X_train,y_train)
        #จึงทำให้ไฟล์ Step4 PCP_Optimization ทำนายผิด
        #ต้องเปลี่ยนข้อมูลการ train เป็น X_train,y_train

```

Out[6]: MultiOutputRegressor(estimator=GRNN(n_restarts_optimizer=4), n_jobs=4)

```

In [7]: #ลองทำนายผลโดยใช้เทียบกับข้อมูล X_test
        Prediction_GRNN = model_GRNN.predict(X_test) #ในบรรทัดนี้ให้แบบจำลองทำนายผล

        #ตกแต่งข้อมูลโดยการเติมชื่อ Colum เข้าไป ปกติจะเป็น 0 1 2 3.....
        Prediction_GRNN = pd.DataFrame(Prediction_GRNN, columns=Output.columns)
        Prediction_GRNN = Prediction_GRNN.set_index(y_test.index) #set ค่า index ให้ตรงกับข้อมูล y_test

```

```

In [8]: #เซฟไว้ในไฟล์ที่จะเอาผลการทำนายไปแปลผลใน Excel
        with pd.ExcelWriter('D:\ป.เอก\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Code python Opti
        y_test.to_excel(writer, sheet_name='Test') #จะเซฟไว้เป็น 2 tab โดย tab แรกชื่อ test
        Prediction_GRNN.to_excel(writer, sheet_name='Prediction') #tab ที่ 2 ชื่อ Prediction

        #-----ความจริงจบตั้งแต่ขั้นตอนนี้นี้แล้ว-----

```

```

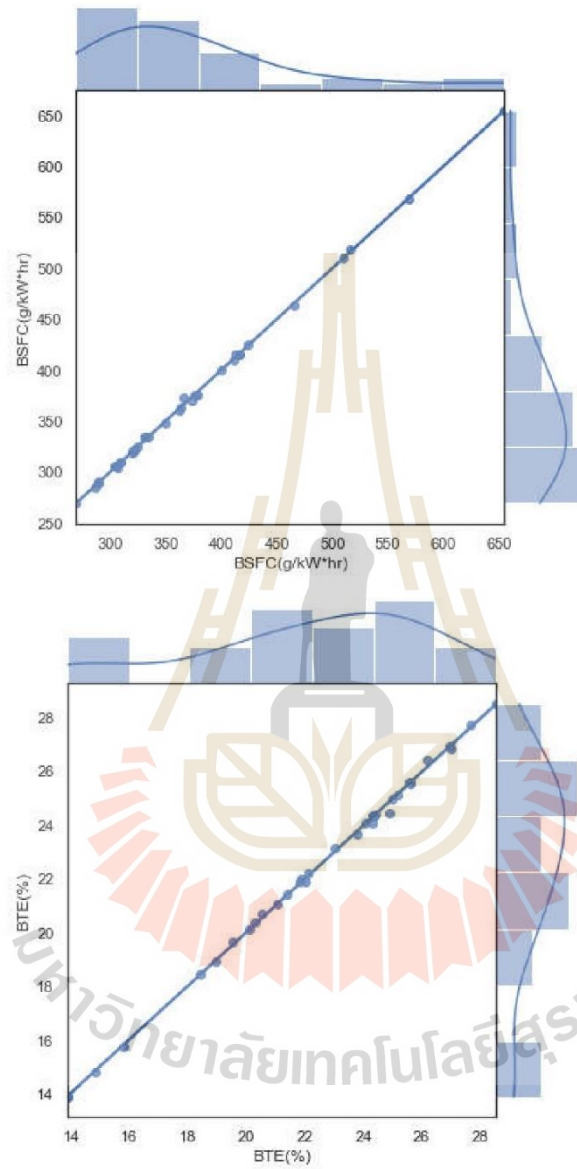
In [9]: #-----ลอง plot กราฟใน python -----

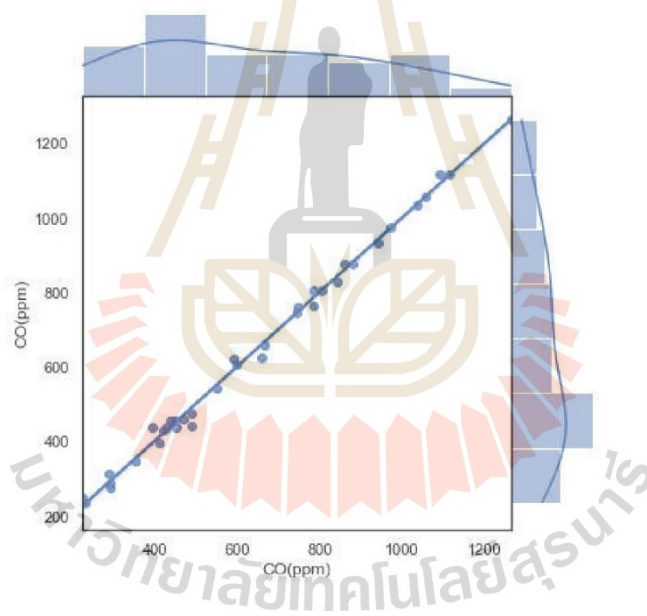
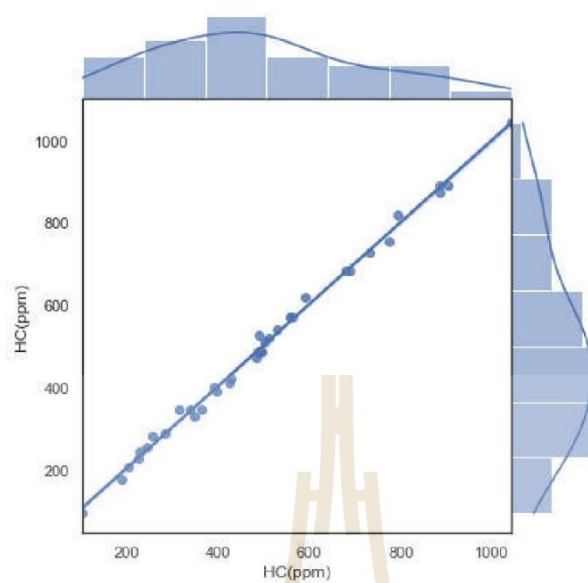
        sns.set(style="white", color_codes=True)
        s1 = sns.jointplot(x=y_test['BSFC(g/kW*hr)'], y= Prediction_GRNN['BSFC(g/kW*hr)'],
        s2 = sns.jointplot(x=y_test['BTE(%)'], y= Prediction_GRNN['BTE(%)'], kind='
        s3 = sns.jointplot(x=y_test['HC(ppm)'], y= Prediction_GRNN['HC(ppm)'], kind=
        s4 = sns.jointplot(x=y_test['CO(ppm)'], y= Prediction_GRNN['CO(ppm)'], kind=

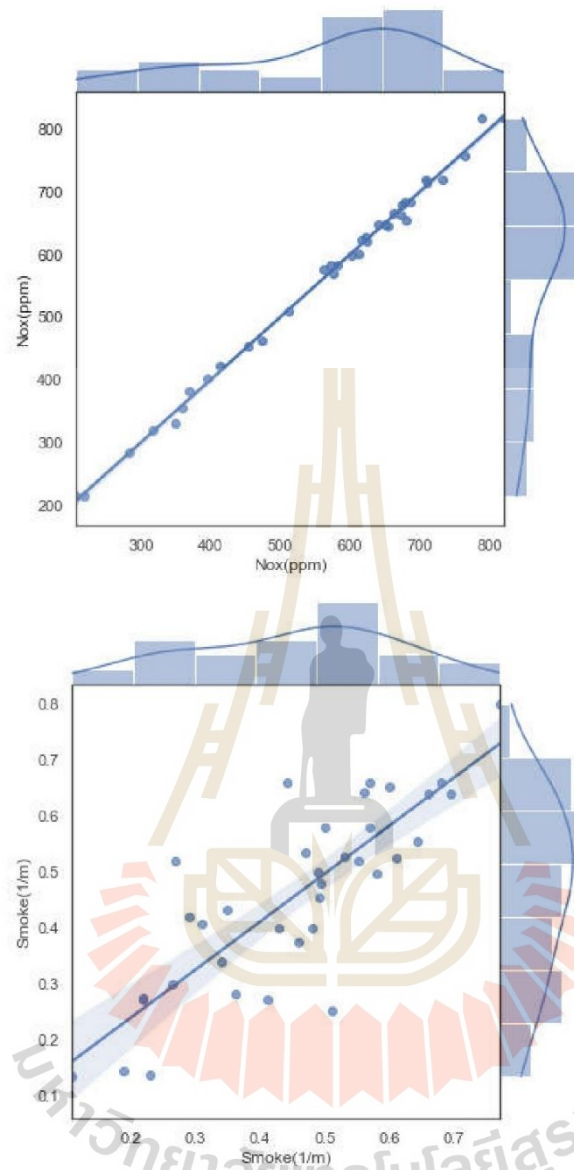
```

```
s5 =sns.jointplot(x=y_test['Nox(ppm)'], y= Prediction_GRNN['Nox(ppm)'], kind
s6 =sns.jointplot(x=y_test['Smoke(1/m)'], y= Prediction_GRNN['Smoke(1/m)'], ki
```

#หมายเหตุ: ต้องตั้งชื่อ colume ให้ตรงกับไฟล์ Excel







```
In [10]: s1.savefig('s1.png')
          plt.close(s1.fig)

          s2.savefig('s2.png')
          plt.close(s2.fig)

          s3.savefig('s3.png')
          plt.close(s3.fig)

          s4.savefig('s4.png')
```

```
plt.close(s4.fig)

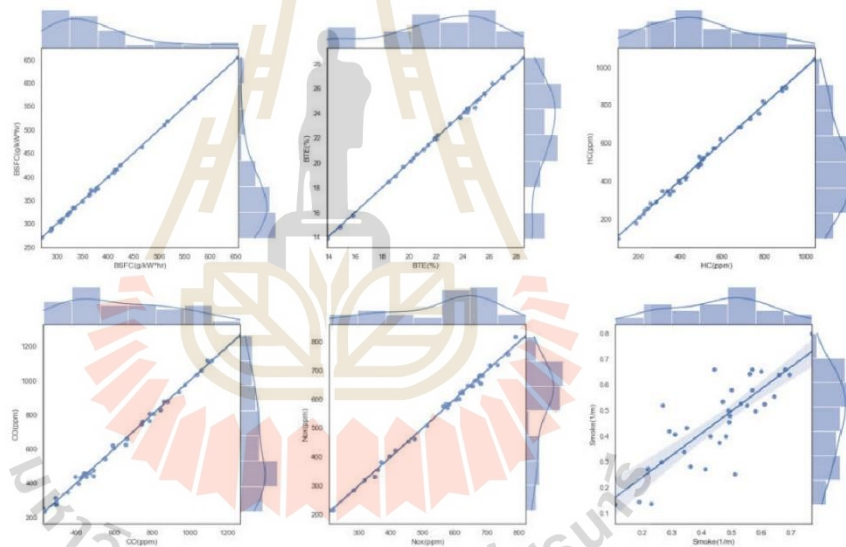
s5.savefig('s5.png')
plt.close(s5.fig)

s6.savefig('s6.png')
plt.close(s6.fig)
```

```
In [11]: #เอากราฟด้านหน้ามา plot รวมกัน
import matplotlib.image as mpimg
f, axarr = plt.subplots(2, 3, figsize=(25, 16))
axarr[0,0].imshow(mpimg.imread('s1.png'))
axarr[0,1].imshow(mpimg.imread('s2.png'))
axarr[0,2].imshow(mpimg.imread('s3.png'))
axarr[1,0].imshow(mpimg.imread('s4.png'))
axarr[1,1].imshow(mpimg.imread('s5.png'))
axarr[1,2].imshow(mpimg.imread('s6.png'))

# turn off x and y axis
[ax.set_axis_off() for ax in axarr.ravel()]

plt.tight_layout()
plt.show()
f.savefig('All_Marginal.png')
```



```
In [12]: #ในส่วนของการ Export แบบจำลอง โดยใช้ joblib
#จะเรียกแบบจำลองนี้ว่า Pre-train model คือแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ได้เลย ไม่ต้องนำมา train อีก
#save the model as a pickle in a file
#joblib.dump(model_GRNN, 'GRNN.pkl') #Export model GRNN
import joblib
joblib.dump(model_GRNN, 'GRNN_new2.pkl') #Export model GRNN
```

```
Out[12]: ['GRNN_new2.pkl']
```

```
In [13]: print(model_GRNN)
```

```
MultiOutputRegressor(estimator=GRNN(n_restarts_optimizer=4), n_jobs=4)
```

```
In [14]: model_GRNN.predict(X_test)
```

```
Out[14]: array([[ 5.177950e+02,  1.479000e+01,  5.404800e+02,  2.363550e+02,
                  3.291200e+02,  1.325000e-01],
                 [ 4.093550e+02,  2.219500e+01,  6.193150e+02,  1.261690e+03,
                  6.008050e+02,  8.000000e-01],
                 [ 2.887550e+02,  2.694000e+01,  2.085300e+02,  6.249100e+02,
                  6.777600e+02,  5.200000e-01],
                 [ 3.476900e+02,  2.311000e+01,  5.219050e+02,  1.055395e+03,
                  6.213600e+02,  6.525000e-01],
                 [ 4.632750e+02,  1.962000e+01,  1.043450e+03,  1.033245e+03,
                  5.684550e+02,  4.995000e-01],
                 [ 6.547600e+02,  1.388000e+01,  4.859900e+02,  4.547800e+02,
                  2.141700e+02,  6.600000e-01],
                 [ 3.629100e+02,  2.143500e+01,  1.796000e+02,  3.964600e+02,
                  5.079100e+02,  4.550000e-01],
                 [ 2.688600e+02,  2.847500e+01,  4.013600e+02,  4.398750e+02,
                  6.647350e+02,  2.740000e-01],
                 [ 3.195800e+02,  2.434000e+01,  3.469000e+02,  4.374800e+02,
                  5.823400e+02,  2.700000e-01],
                 [ 3.048100e+02,  2.552000e+01,  8.209300e+02,  7.452850e+02,
                  6.823600e+02,  4.195000e-01],
                 [ 3.090100e+02,  2.558000e+01,  5.708800e+02,  8.782100e+02,
                  8.178600e+02,  5.800000e-01],
                 [ 3.217850e+02,  2.497000e+01,  5.100650e+02,  6.226550e+02,
                  5.745800e+02,  4.070000e-01],
                 [ 2.853450e+02,  2.770500e+01,  3.489350e+02,  6.056300e+02,
                  6.827950e+02,  4.955000e-01],
                 [ 3.195800e+02,  2.434000e+01,  3.469000e+02,  4.374800e+02,
                  5.823400e+02,  2.700000e-01],
                 [ 5.106700e+02,  1.573500e+01,  2.892200e+02,  2.740300e+02,
                  3.190100e+02,  2.520000e-01],
                 [ 3.757150e+02,  2.104000e+01,  2.470600e+02,  4.613450e+02,
                  4.537350e+02,  4.800000e-01],
                 [ 4.154200e+02,  1.843000e+01,  2.306800e+02,  2.512100e+02,
                  4.024600e+02,  1.350000e-01],
                 [ 3.053150e+02,  2.508000e+01,  2.836100e+02,  7.614700e+02,
                  7.571200e+02,  5.350000e-01],
                 [ 3.090100e+02,  2.558000e+01,  5.708800e+02,  8.782100e+02,
                  8.178600e+02,  5.800000e-01],
                 [ 3.340600e+02,  2.405000e+01,  8.919300e+02,  8.063100e+02,
                  6.477200e+02,  4.000000e-01],
                 [ 3.596750e+02,  2.198000e+01,  7.294100e+02,  4.310550e+02,
                  3.824250e+02,  3.000000e-01],
                 [ 3.344400e+02,  2.363500e+01,  4.729250e+02,  9.742650e+02,
                  6.541950e+02,  5.550000e-01],
                 [ 3.201650e+02,  2.430000e+01,  4.128800e+02,  9.344150e+02,
                  7.136850e+02,  5.250000e-01],
                 [ 3.705150e+02,  2.066500e+01,  4.903050e+02,  3.120400e+02,
                  4.624250e+02,  1.445000e-01],
                 [ 3.340600e+02,  2.405000e+01,  8.919300e+02,  8.063100e+02,
                  6.477200e+02,  4.000000e-01],
                 [ 3.243950e+02,  2.437000e+01,  8.754750e+02,  7.648800e+02,
                  6.618800e+02,  4.325000e-01],
                 [ 3.040450e+02,  2.643000e+01,  3.909650e+02,  6.596650e+02,
                  6.452500e+02,  6.600000e-01],
                 [ 4.246350e+02,  1.892500e+01,  2.555050e+02,  4.752350e+02,
                  4.227000e+02,  5.265000e-01],
                 [ 3.720500e+02,  2.442000e+01,  5.274600e+02,  8.278050e+02,
                  6.216400e+02,  6.415000e-01],
                 [ 4.150500e+02,  2.189000e+01,  6.845500e+02,  1.117020e+03,
                  7.191500e+02,  6.400000e-01],
                 [ 3.757650e+02,  2.037500e+01,  9.634000e+01,  3.477250e+02,
                  5.986100e+02,  3.745000e-01],
                 [ 6.547600e+02,  1.388000e+01,  4.859900e+02,  4.547800e+02,
                  2.141700e+02,  6.600000e-01],
```

```
[2.902400e+02, 2.680000e+01, 4.233800e+02, 5.419950e+02,
 6.280750e+02, 2.800000e-01],
[3.995250e+02, 2.011500e+01, 7.570050e+02, 4.388700e+02,
 3.536300e+02, 3.390000e-01],
[5.675200e+02, 1.392500e+01, 3.320300e+02, 2.875500e+02,
 2.823750e+02, 5.185000e-01],
[4.150500e+02, 2.189000e+01, 6.845500e+02, 1.117020e+03,
 7.191500e+02, 6.400000e-01]]
```

```
In [15]: from sklearn.metrics import classification_report, confusion_matrix

e = model_GRNN.predict(X_test)
print(confusion_matrix(y_test, e))
print(classification_report(y_test, e))
```

```
-----
ValueError                                Traceback (most recent call last)
<ipython-input-15-29af3d0d68f0> in <module>
      2
      3 e = model_GRNN.predict(X_test)
----> 4 print(confusion_matrix(y_test, e))
      5 print(classification_report(y_test, e))

~\anaconda3\lib\site-packages\sklearn\utils\validation.py in inner_f(*args, **kwargs)
    61         extra_args = len(args) - len(all_args)
    62         if extra_args <= 0:
--> 63             return f(*args, **kwargs)
    64
    65         # extra_args > 0

~\anaconda3\lib\site-packages\sklearn\metrics\_classification.py in confusion_matrix(
y_true, y_pred, labels, sample_weight, normalize)
    294
    295     """
--> 296     y_type, y_true, y_pred = _check_targets(y_true, y_pred)
    297     if y_type not in ("binary", "multiclass"):
    298         raise ValueError("%s is not supported" % y_type)

~\anaconda3\lib\site-packages\sklearn\metrics\_classification.py in _check_targets(y_
true, y_pred)
    98     # No metrics support "multiclass-multioutput" format
    99     if (y_type not in ["binary", "multiclass", "multilabel-indicator"]):
--> 100         raise ValueError("{0} is not supported".format(y_type))
    101
    102     if y_type in ["binary", "multiclass"]:

ValueError: continuous-multioutput is not supported
```

```
In [ ]:
```

Source Code Optimization

```

In [15]: #Import clear terminal
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

import os
os.system('cls')
import time

#Import related library
import numpy as np
import pandas as pd
import joblib
import matplotlib.pyplot as plt

#Import optimization library
from pymoo.core.problem import ElementwiseProblem
from pymoo.optimize import minimize
from pymoo.algorithms import GDE3
from pymoo.operators.selection.tournament import TournamentSelection
from pymoo.algorithms.moo.rvea import RVEA
from pymoo.operators.selection.rank import RankAndCrowding
from pymoo.operators.sampling.rnd import IntegerRandomSampling
from pymoo.util.ref_dirs import get_reference_directions
from pymoo.algorithms import NSDER
from pymoo.operators.crossover.sbx import SBX
from pymoo.operators.mutation.pm import PM
from pymoo.operators.repair.rounding import RoundingRepair

In [16]: import shutil
columns = shutil.get_terminal_size().columns

#Import surrogate function for many objective
# Load the pickled model
model = joblib.load('GRNN_new2.pkl')

In [17]: #Define function
def OpFunc(A, B, C):
    Z = np.array([A, B, C]).reshape(1, -1)
    Pre = model.predict(Z)
    if (np.all(Pre==0)) == True:
        Pre = np.dot(abs(Pre), 1000000)
    else:
        Pre = Pre
    return Pre[:,0], -Pre[:,1], Pre[:,2], Pre[:,3], Pre[:,4], Pre[:,5]

In [18]: #Define problem
class MyProblem(ElementwiseProblem):
    def __init__(self):
        xl = [0, 2000, 25]
        xu = [100, 3000, 90]
        super().__init__(n_var=3, n_obj=6, n_ieq_constr=0, xl=xl,
                        xu=xu, vtype=float)

    def _evaluate(self, x, out, *args, **kwargs):
        F = OpFunc(x[0], x[1], x[2])
        out["F"] = F

```

```

In [19]: #define initial parameters
problem = MyProblem()

ref_dirs = ref_dirs = get_reference_directions("das-dennis", 6, n_partitions=6)

kwargs = {
    "sampling": IntegerRandomSampling(),
    "variant": "DE/rand-to-best/1/bin",
    "crossover": SBX(prob_var = 1, eta= 3.0, vtype=float, repair=RoundingRepair()),
    "mutation": PM(prob_var = 1, eta= 3.0, vtype=float, repair=RoundingRepair()),
    "ref_dirs": ref_dirs,
    "pop_size": len(ref_dirs),
}

```

```

In [20]: #define algorithm(1)- GDE3MNN
algorithmGD = GDE3(
    CR=0.7,
    gamma=1e-4,
    survival= RankAndCrowding(crowding_func="2nn"),
    **kwargs,
)

algorithmNS = NSDER(
    **kwargs,
    F = (0, 10),
    CR=0.7,
)

algorithmRVEA = RVEA(
    **kwargs,
    eliminate_duplicates = True
)

```

```

In [21]: #print ("GDE3MNN".center(columns))
#start_GDE = time.time()
res_GDE3MNN = minimize(
    problem,
    algorithmGD,
    ('n_gen', 100),
    verbose=True,
    save_history=True,
    seed=1
)

#end_GDE = time.time()
#print("Time in GDE optimal process :", ((end_GDE-start_GDE)/60).__round__(2), "min"

```

n_gen	n_eval	n_nds	eps	indicator
1	462	462	-	-
2	924	462	0.0189309577	ideal
3	1386	462	0.0452451270	ideal
4	1848	462	0.1898099564	nadir
5	2310	462	0.0090722856	ideal
6	2772	462	0.0302531502	ideal
7	3234	462	0.0542464705	nadir
8	3696	462	0.0001485241	f
9	4158	462	0.0155341976	ideal
10	4620	462	9.067488E-15	f
11	5082	462	0.0000919607	f

12	5544	462	0.0000919607	f
13	6006	462	0.0003233856	f
14	6468	462	0.0005644565	f
15	6930	462	0.0005644565	f
16	7392	462	0.0005644565	f
17	7854	462	0.0008664536	f
18	8316	462	0.0011045945	f
19	8778	462	0.0014822055	f
20	9240	462	0.0015723686	f
21	9702	462	0.0015723686	f
22	10164	462	0.0015723686	f
23	10626	462	0.0015732814	f
24	11088	462	0.0016913571	f
25	11550	462	0.0017637594	f
26	12012	462	0.0019848174	f
27	12474	462	0.0023453403	f
28	12936	462	0.0027064765	f
29	13398	462	3.150957E-18	f
30	13860	462	0.0002309786	f
31	14322	462	0.0002319149	f
32	14784	462	0.0002319159	f
33	15246	462	0.0002319159	f
34	15708	462	0.0002323826	f
35	16170	462	0.0002323831	f
36	16632	462	0.0002323831	f
37	17094	462	0.0005242071	f
38	17556	462	0.0005242071	f
39	18018	462	0.0005242071	f
40	18480	462	0.0005242071	f
41	18942	462	0.0005242071	f
42	19404	462	0.0005242071	f
43	19866	462	0.0006491234	f
44	20328	462	0.0006491235	f
45	20790	462	0.0006491235	f
46	21252	462	0.0006491235	f
47	21714	462	0.0009409475	f
48	22176	462	0.0010571275	f
49	22638	462	0.0010571275	f
50	23100	462	0.0012119870	f
51	23562	462	0.0012119870	f
52	24024	462	0.0012119870	f
53	24486	462	0.0012119942	f
54	24948	462	0.0012119942	f
55	25410	462	0.0012119942	f
56	25872	462	0.0014833596	f
57	26334	462	0.0014833596	f
58	26796	462	0.0014833596	f
59	27258	462	0.0014833596	f
60	27720	462	0.0014833596	f
61	28182	462	0.0014838964	f
62	28644	462	0.0014838964	f
63	29106	462	0.0014838964	f
64	29568	462	0.0016425890	f
65	30030	462	0.0016426083	f
66	30492	462	0.0016554941	f
67	30954	462	0.0020621231	f
68	31416	462	0.0020621231	f
69	31878	462	0.0020621231	f
70	32340	462	0.0020621231	f
71	32802	462	0.0022208157	f
72	33264	462	0.0022208157	f
73	33726	462	0.0022208157	f
74	34188	462	0.0022382304	f
75	34650	462	0.0022382304	f
76	35112	462	0.0025196469	f
77	35574	462	0.0001358823	f
78	36036	462	0.0001358823	f
79	36498	462	0.0001358823	f
80	36960	462	0.0001368814	f

81	37422	462	0.0001520841	f
82	37884	462	0.0001520842	f
83	38346	462	0.0001520842	f
84	38808	462	0.0001520842	f
85	39270	462	0.0001520842	f
86	39732	462	0.0001520842	f
87	40194	462	0.0001521016	f
88	40656	462	0.0001521016	f
89	41118	462	0.0001524675	f
90	41580	462	0.0001524675	f
91	42042	462	0.0001524675	f
92	42504	462	0.0001524675	f
93	42966	462	0.0001669876	f
94	43428	462	0.0001669876	f
95	43890	462	0.0001672505	f
96	44352	462	0.0001689283	f
97	44814	462	0.0001689283	f
98	45276	462	0.0001689283	f
99	45738	462	0.0001689284	f
100	46200	462	0.0001689284	f

```
In [22]: res_NS= minimize(
    problem,
    algorithmNS,
    ('n_gen', 100),
    verbose=True,
    save_history=True,
    seed=1,
)
```

n_gen	n_eval	n_nds	eps	indicator
1	462	5	-	-
2	924	8	0.0718173837	ideal
3	1386	11	0.0569784707	ideal
4	1848	15	0.0539069359	ideal
5	2310	16	0.1135807432	nadir
6	2772	14	0.4436570077	nadir
7	3234	14	0.3073146913	nadir
8	3696	12	0.4436570077	nadir
9	4158	13	0.1364636169	nadir
10	4620	15	0.3073146913	nadir
11	5082	13	0.4436570077	nadir
12	5544	13	0.0091553455	ideal
13	6006	13	1.207763E-17	f
14	6468	13	1.207763E-17	f
15	6930	14	0.0090722856	ideal
16	7392	13	0.0091553455	ideal
17	7854	17	0.0090722856	ideal
18	8316	13	0.4436570077	nadir
19	8778	14	0.0292221745	nadir
20	9240	13	0.0634165513	nadir
21	9702	13	0.000000E+00	f
22	10164	16	0.3073146913	nadir
23	10626	14	0.4436570077	nadir
24	11088	17	0.3073146913	nadir
25	11550	14	0.4436570077	nadir
26	12012	14	0.1580287984	nadir
27	12474	14	0.1364636169	nadir
28	12936	18	0.3073146913	nadir
29	13398	14	0.4436570077	nadir
30	13860	14	0.0651870992	nadir
31	14322	12	0.1708138541	nadir
32	14784	13	0.0091553455	ideal
33	15246	17	0.0090722856	ideal
34	15708	17	9.235838E-18	f
35	16170	14	0.4436570077	nadir

36	16632	16	0.3073146913	nadir
37	17094	18	0.0179060351	f
38	17556	14	0.4436570077	nadir
39	18018	14	0.0292221745	nadir
40	18480	14	0.0267023131	f
41	18942	14	0.0283924843	nadir
42	19404	13	0.0091553455	ideal
43	19866	16	0.0090722856	ideal
44	20328	14	0.4436570077	nadir
45	20790	17	0.3073146913	nadir
46	21252	14	0.4436570077	nadir
47	21714	14	4.345603E-17	f
48	22176	13	0.0091553455	ideal
49	22638	16	0.0090722856	ideal
50	23100	14	0.4436570077	nadir
51	23562	14	3.295521E-17	f
52	24024	13	0.0091553455	ideal
53	24486	17	0.0090722856	ideal
54	24948	13	0.0091553455	ideal
55	25410	17	0.0090722856	ideal
56	25872	13	0.0091553455	ideal
57	26334	13	0.0090722856	ideal
58	26796	14	0.1458932635	nadir
59	27258	14	0.0091553455	ideal
60	27720	13	3.220016E-17	f
61	28182	14	0.0090722856	ideal
62	28644	14	0.0651870992	nadir
63	29106	13	0.1708138541	nadir
64	29568	15	0.3073146913	nadir
65	30030	12	0.4436570077	nadir
66	30492	14	0.0091553455	ideal
67	30954	13	3.220016E-17	f
68	31416	16	0.0090722856	ideal
69	31878	13	0.4436570077	nadir
70	32340	14	0.0201932072	f
71	32802	15	0.0091553455	ideal
72	33264	15	0.0090722856	ideal
73	33726	15	0.1009926945	nadir
74	34188	14	0.0091553455	ideal
75	34650	15	0.0090722856	ideal
76	35112	15	0.0651870992	nadir
77	35574	15	0.1009926945	nadir
78	36036	15	0.0283924843	nadir
79	36498	15	6.262734E-17	f
80	36960	18	0.2125068801	nadir
81	37422	14	0.0091553455	ideal
82	37884	15	0.0090722856	ideal
83	38346	14	0.0091553455	ideal
84	38808	15	0.0090722856	ideal
85	39270	15	4.593253E-17	f
86	39732	15	0.0002247105	f
87	40194	15	0.0002247105	f
88	40656	15	0.0651870992	nadir
89	41118	15	0.0091553455	ideal
90	41580	15	0.0090722856	ideal
91	42042	14	0.0091553455	ideal
92	42504	14	4.008118E-17	f
93	42966	17	0.0090722856	ideal
94	43428	15	0.0091553455	ideal
95	43890	15	0.0090722856	ideal
96	44352	15	1.933206E-17	f
97	44814	15	0.0283924843	nadir
98	45276	17	0.0816326686	nadir
99	45738	15	0.0888889073	nadir
100	46200	15	1.025540E-10	f

```
In [23]: res_REA= minimize(
          problem,
          algorithmRVEA,
```

```

('n_gen', 100),
verbose=True,
save_history=True,
seed=1,
)

```

n_gen	n_eval	n_nds	eps	indicator
1	462	462	-	-
2	924	7	0.1436607501	ideal
3	1386	12	0.1809805060	ideal
4	1848	12	0.1082240397	nadir
5	2310	12	3.608565E-17	f
6	2772	14	0.2645158798	nadir
7	3234	14	4.363300E-11	f
8	3696	14	4.363300E-11	f
9	4158	14	0.0072326899	f
10	4620	14	1.429631E-17	f
11	5082	11	0.0539785427	ideal
12	5544	11	0.5022636781	nadir
13	6006	11	0.0735157464	nadir
14	6468	11	5.870683E-17	f
15	6930	11	5.870683E-17	f
16	7392	11	0.1298664882	nadir
17	7854	11	2.256849E-17	f
18	8316	12	0.2020618557	nadir
19	8778	12	0.0237627455	f
20	9240	12	0.0165696467	f
21	9702	16	0.2110577916	nadir
22	10164	17	0.0976553802	nadir
23	10626	17	0.0570584761	ideal
24	11088	17	0.0328178928	f
25	11550	17	6.922490E-07	f
26	12012	17	6.922490E-07	f
27	12474	17	0.0185648019	nadir
28	12936	17	4.222675E-14	f
29	13398	17	0.0003813078	f
30	13860	17	0.0003813079	f
31	14322	14	0.2997475231	nadir
32	14784	15	0.3009631511	nadir
33	15246	15	1.812987E-17	f
34	15708	15	0.0239920330	nadir
35	16170	15	0.000000E+00	f
36	16632	16	0.0539785427	ideal
37	17094	16	1.699675E-17	f
38	17556	17	0.2216666690	nadir
39	18018	17	1.377048E-08	f
40	18480	17	1.377048E-08	f
41	18942	14	0.3783924809	nadir
42	19404	14	0.1101458177	nadir
43	19866	14	0.000000E+00	f
44	20328	14	1.386051E-09	f
45	20790	14	1.386051E-09	f
46	21252	14	1.386051E-09	f
47	21714	14	1.386051E-09	f
48	22176	14	1.386051E-09	f
49	22638	14	1.386051E-09	f
50	23100	14	1.386051E-09	f
51	23562	16	0.1897438247	nadir
52	24024	16	0.0157793166	ideal
53	24486	16	0.0088030104	f
54	24948	17	0.0157879660	f
55	25410	17	2.308959E-17	f
56	25872	17	0.0041425931	f
57	26334	17	0.000000E+00	f
58	26796	17	4.617919E-18	f
59	27258	17	4.617919E-18	f
60	27720	17	4.617919E-18	f

61	28182	15	0.5241391399	nadir
62	28644	16	0.0406379209	ideal
63	29106	16	0.1135807432	nadir
64	29568	16	5.022462E-17	f
65	30030	16	5.022462E-17	f
66	30492	16	0.0539785427	ideal
67	30954	16	9.813078E-18	f
68	31416	16	9.813078E-18	f
69	31878	16	9.813078E-18	f
70	32340	16	1.874539E-10	f
71	32802	15	0.0474685397	ideal
72	33264	15	0.0237570415	f
73	33726	15	0.1981250000	nadir
74	34188	15	3.711882E-17	f
75	34650	15	0.0200251496	f
76	35112	15	2.353367E-17	f
77	35574	15	2.353367E-17	f
78	36036	16	0.1332396603	nadir
79	36498	16	0.0058399506	f
80	36960	16	0.0141958706	f
81	37422	14	0.2260536398	nadir
82	37884	14	0.0176556726	f
83	38346	14	0.000000E+00	f
84	38808	14	0.0399598480	nadir
85	39270	14	0.0082560676	f
86	39732	14	0.000000E+00	f
87	40194	14	1.942486E-17	f
88	40656	14	1.942486E-17	f
89	41118	14	1.942486E-17	f
90	41580	14	1.942486E-17	f
91	42042	13	0.0091553455	ideal
92	42504	14	0.0620209074	f
93	42966	15	0.0141063844	f
94	43428	15	0.0539785427	ideal
95	43890	15	1.281975E-17	f
96	44352	15	1.281975E-17	f
97	44814	17	0.3062500000	nadir
98	45276	17	0.0125539141	f
99	45738	17	0.0034688873	f
100	46200	17	2.805236E-08	f

```
In [24]: from pymoo.util.running_metric import RunningMetricAnimation

running = RunningMetricAnimation(delta_gen=100,
                                  n_plots=1,
                                  key_press=False,
                                  do_show=True)

for algorithm in res_GDE3MNN.history:
    running.update(algorithm)

res_GDE3MNN_X = pd.DataFrame(res_GDE3MNN.X, columns=['BHD','RPM','Load'])
res_GDE3MNN_F = pd.DataFrame(res_GDE3MNN.F, columns=['BSFC','BTE','HC','CO','Nox','S
res_NS_X = pd.DataFrame(res_NS.X, columns=['BHD','RPM','Load'])
res_NS_F = pd.DataFrame(res_NS.F, columns=['BSFC','BTE','HC','CO','Nox','Smoke'])
res_REA_X = pd.DataFrame(res_REA.X, columns=['BHD','RPM','Load'])
res_REA_F = pd.DataFrame(res_REA.F, columns=['BSFC','BTE','HC','CO','Nox','Smoke'])

GDE3MNN = pd.concat([res_GDE3MNN_X, res_GDE3MNN_F], axis=1)
GDE3MNN = GDE3MNN.replace(0, pd.np.nan)
GDE3MNN = GDE3MNN.dropna()

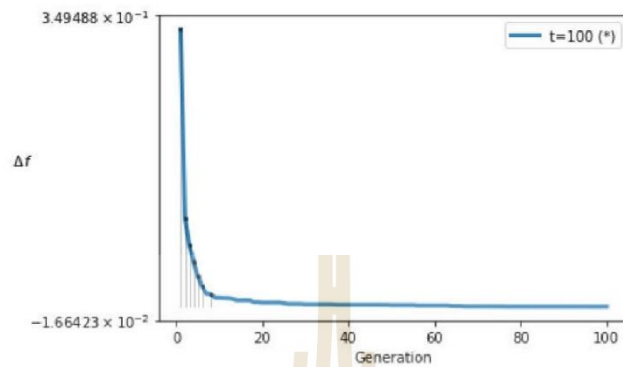
NS = pd.concat([res_NS_X, res_NS_F], axis=1)
```

```

NS = NS.replace(0, pd.np.nan)
NS = NS.dropna()

RV = pd.concat([res_REA_X, res_REA_F], axis=1)

```



```

In [25]: with pd.ExcelWriter("D:\ป.เอก\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Code python Optimize
GDE3MNN.to_excel(writer, sheet_name='GDE')
NS.to_excel(writer, sheet_name='NSDE-R')
RV.to_excel(writer, sheet_name='RVEA')

```

Source Code Parallel Coordinate Plot (PCP)

```
In [1]: #Import related Library
import pandas as pd
import numpy as np
from pymoo.visualization.pcp import PCP
```

```
In [4]: Actual = pd.read_excel(r'D:\U.lean\Thesis Doctor\Performance Emission and Combustion BI
index_col="Index")
Actual = Actual.drop(columns="Replicate", axis= 1)
Actual = Actual.loc[:,['BSFC(g/kW*hr)', 'BTE(%)', 'HC(ppm)', 'CO(ppm)', 'Nox(ppm)', '
print (Actual.head(5))
```

	BSFC	BTE	HC	CO	Nox	Smoke
Index						
76	408.85	22.22	614.52	1261.39	608.57	0.81
175	303.89	26.44	369.48	657.55	646.95	0.80
16	409.86	22.17	624.11	1261.99	593.04	0.79
136	410.91	22.11	591.37	1264.62	612.99	0.77
135	385.31	23.58	295.03	949.63	564.75	0.74

```
In [5]: Optimize_DE = pd.read_excel(r'D:\U.lean\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Code python
Optimize_DE = Optimize_DE.loc[:,['BSFC', 'BTE', 'HC', 'CO', 'Nox', 'Smoke']]
Optimize_DE['BTE'] = abs(Optimize_DE['BTE'])
Optimize_DE = Optimize_DE.round(3)
print (Optimize_DE.head(5))
```

	BSFC	BTE	HC	CO	Nox	Smoke
0	481.983	18.850	854.003	537.333	312.430	0.411
1	386.460	23.510	302.865	949.570	567.145	0.710
2	654.670	13.880	486.405	450.120	210.280	0.670
3	386.460	23.510	302.865	949.570	567.145	0.710
4	256.155	29.885	291.965	508.645	795.740	0.344

```
In [6]: Optimize_UN = pd.read_excel(r'D:\U.lean\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Code python
sheet_name='NSDE-R')
Optimize_UN = Optimize_UN.loc[:,['BSFC', 'BTE', 'HC', 'CO', 'Nox', 'Smoke']]
Optimize_UN['BTE'] = abs(Optimize_UN['BTE'])
Optimize_UN = Optimize_UN.round(3)
print (Optimize_UN.head(5))
```

	BSFC	BTE	HC	CO	Nox	Smoke
0	362.990	21.430	178.850	405.690	509.210	0.440
1	498.465	15.360	146.650	164.635	299.165	0.392
2	415.825	18.410	229.230	234.325	396.095	0.195
3	450.507	17.547	269.334	210.334	339.033	0.263
4	271.333	28.217	83.333	605.000	681.967	0.495

```
In [7]: Optimize_RV = pd.read_excel(r'D:\U.lean\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Code python
sheet_name='RVEA')
Optimize_RV = Optimize_RV.loc[:,['BSFC', 'BTE', 'HC', 'CO', 'Nox', 'Smoke']]
Optimize_RV['BTE'] = abs(Optimize_RV['BTE'])
Optimize_RV = Optimize_RV.round(3)
print (Optimize_RV.head(5))
```

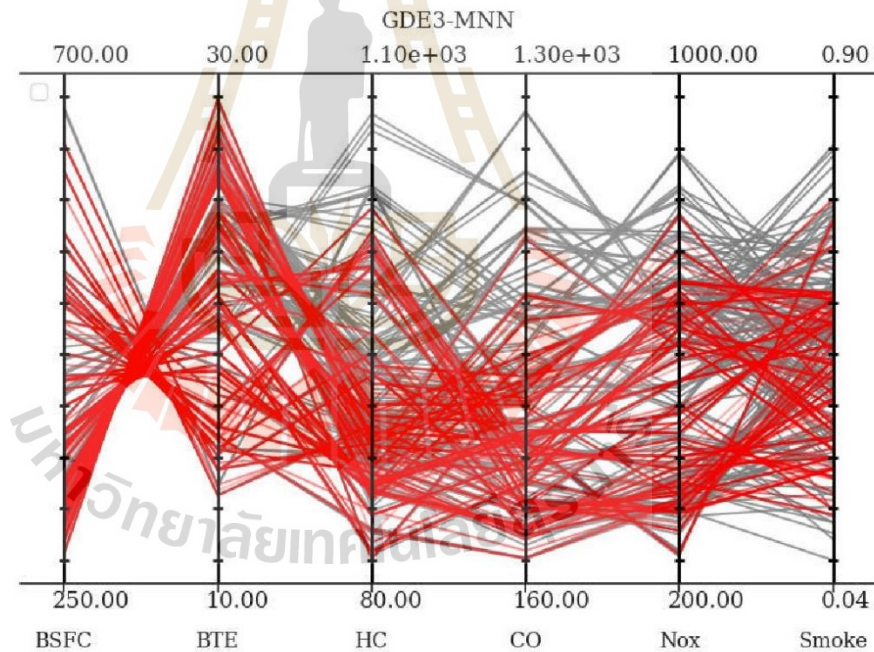
	BSFC	BTE	HC	CO	Nox	Smoke
0	530.523	17.127	355.333	388.667	322.833	0.436
1	369.667	24.578	514.695	832.382	619.884	0.618
2	510.053	15.753	288.003	279.000	318.400	0.338

3	305.445	26.310	404.826	663.341	648.818	0.481
4	360.805	21.910	725.956	421.381	378.879	0.268

```
In [7]: from pymoo.visualization.pcp import PCP
import matplotlib.pyplot as plt
plot = PCP(
    title = ("GDE3-MNN", {'pad': 30}),
    labels=["BSFC", "BTE", "HC", "CO", "Nox", "Smoke"],
    n_ticks=10,
    legend=(True, {'loc': "upper left"}),
)
plot.set_axis_style(color="black", alpha=1)
plot.bounds=[[250,10,80,160,200,0.04],[700,30,1100,1300,1000,0.9]]
plot.add(np.array(Actual), color="grey", alpha=0.8)
plot.add(np.array(Optimize_DE), color="red", alpha=0.3)
plot.figsize=(10, 6)
plot.show()
```

No artists with labels found to put in legend. Note that artists whose label start with an underscore are ignored when legend() is called with no argument.

```
Out[7]: <pymoo.visualization.pcp.PCP at 0x2223096d3f0>
```



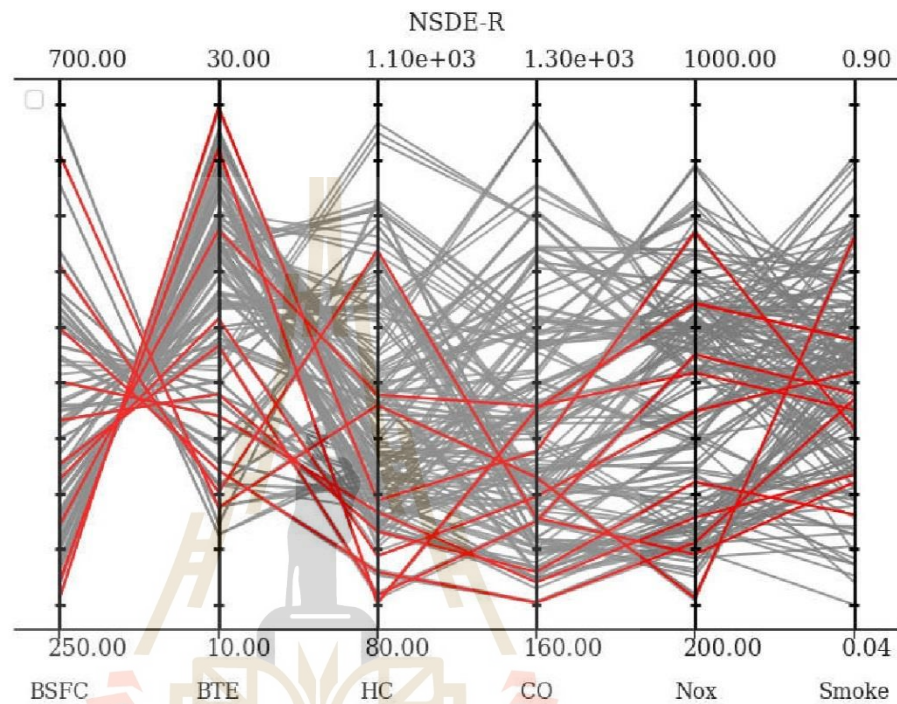
```
In [8]: from pymoo.visualization.pcp import PCP

plot = PCP(
    title = ("NSDE-R", {'pad': 30}),
    labels=["BSFC", "BTE", "HC", "CO", "Nox", "Smoke"],
    n_ticks=10,
    legend=(True, {'loc': "upper left"}),
)
plot.set_axis_style(color="black", alpha=1)
plot.bounds=[[250,10,80,160,200,0.04],[700,30,1100,1300,1000,0.9]]
plot.add(np.array(Actual), color="grey", alpha=0.8)
```

```
plot.add(np.array(Optimize_UN), color="red", alpha=1)
plot(figsize=(10, 6))
plot.show()
```

No artists with labels found to put in legend. Note that artists whose label start with an underscore are ignored when legend() is called with no argument.

Out[8]: <pymoo.visualization.pcp.PCP at 0x22227a45120>

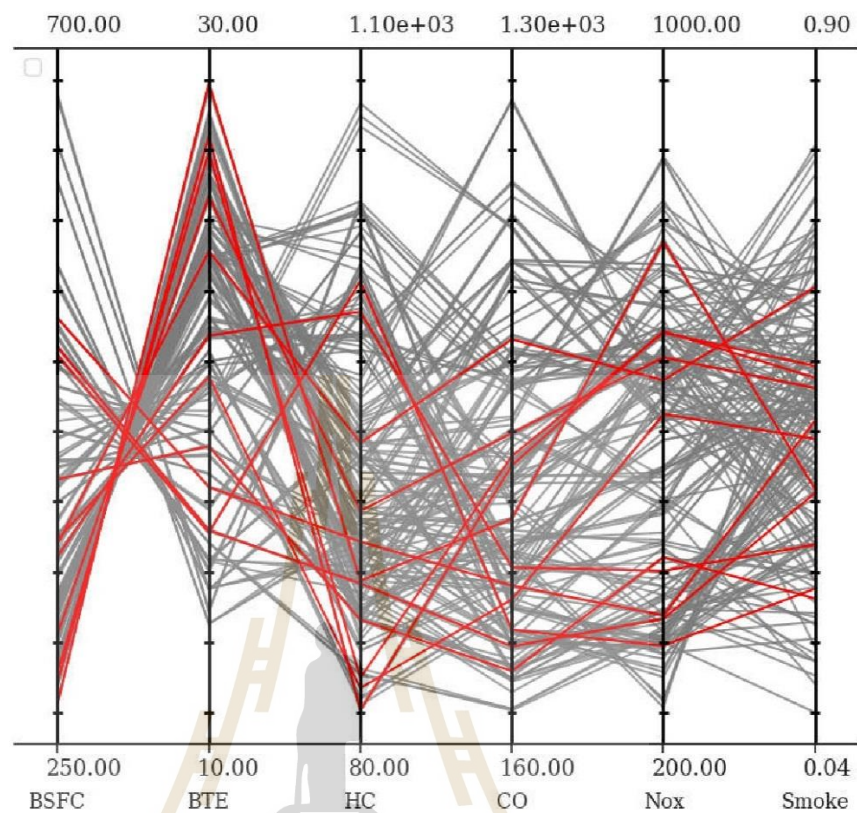


```
In [9]: from pymoo.visualization.pcp import PCP

plot = PCP(
    labels=["BSFC", "BTE", "HC", "CO", "Nox", "Smoke"],
    n_ticks=10,
    legend=(True, {'loc': "upper left"}),
)
plot.set_axis_style(color="black", alpha=1)
plot.bounds=[[250,10,80,160,200,0.04],[700,30,1100,1300,1000,0.9]]
plot.add(np.array(Actual), color="grey", alpha=0.8)
plot.add(np.array(Optimize_RV), color="red", alpha=1)
plot(figsize=(10, 8))
plot.show()
```

No artists with labels found to put in legend. Note that artists whose label start with an underscore are ignored when legend() is called with no argument.

Out[9]: <pymoo.visualization.pcp.PCP at 0x22229103fa0>



In [19]: `Line_Data = pd.read_csv(r"D:\1.เอก\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Code python Opt
print (Line_Data['y'])`

```
0    0.183218
1    0.162303
2    0.144259
3    0.119244
4    0.094638
5    0.072903
6    0.058960
7    0.041326
8    0.027383
9    0.021232
10   0.014260
11   0.009749
12   0.006468
13   0.004418
14   0.004008
15   0.002777
16   0.002777
17   0.002777
18   0.002367
19   0.001547
20   0.001957
21   0.002367
22   0.002777
23   0.002367
24   0.002067
25   0.001957
26   0.001137
```

```

27  0.000727
28  0.000427
29  0.000317
30  0.000317
31  0.000317
32  0.000317
33  0.000317
Name: y, dtype: float64

```

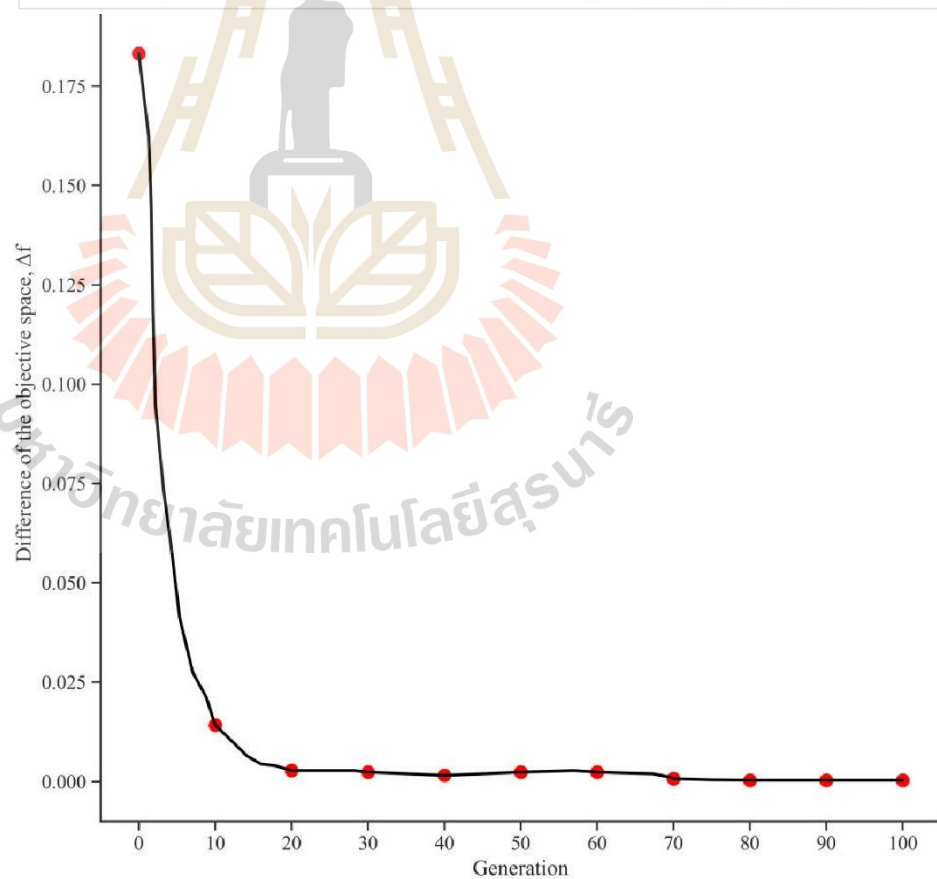
```

In [13]: import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
plt.figure(figsize=(10,10), dpi= 600)
sns.set(style = "white", font = "Times New Roman", font_scale = 1.2, rc={"xtick.bott
sns.lineplot(data= Line_Data, x = Line_Data['x'], y = Line_Data['y'], linewidth=2, c
x_markers = range(0, 101, 10)
plt.xticks(x_markers)

# Scatter plot for red markers
markers_x = range(0, 101, 10)
markers_y = [Line_Data.loc[Line_Data['x'] == x_value, 'y'].values[0] for x_value in
sns.scatterplot(x=markers_x, y=markers_y, color='red', marker='o', s=100)

plt.ylim(-0.01, 0.2)
plt.xlabel('Generation')
plt.ylabel("Difference of the objective space,  $\Delta f$ ")
plt.savefig("D:\1.160\Thesis Doctor\Optimization by Arm\Code python Optimize BHD\Res

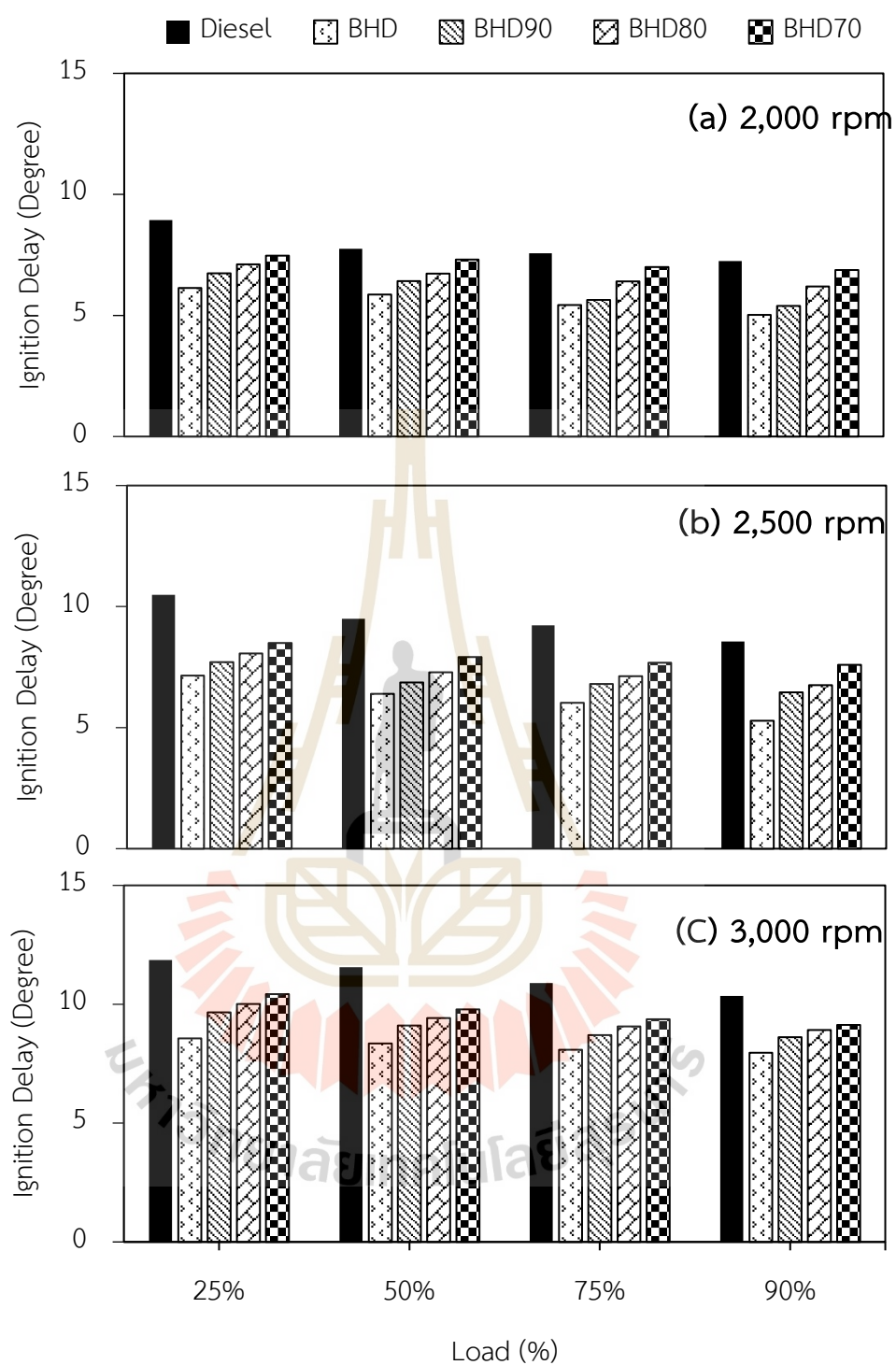
```



ภาคผนวก ณ

ความล่าช้าในการจู่ระเบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันชนิดแตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



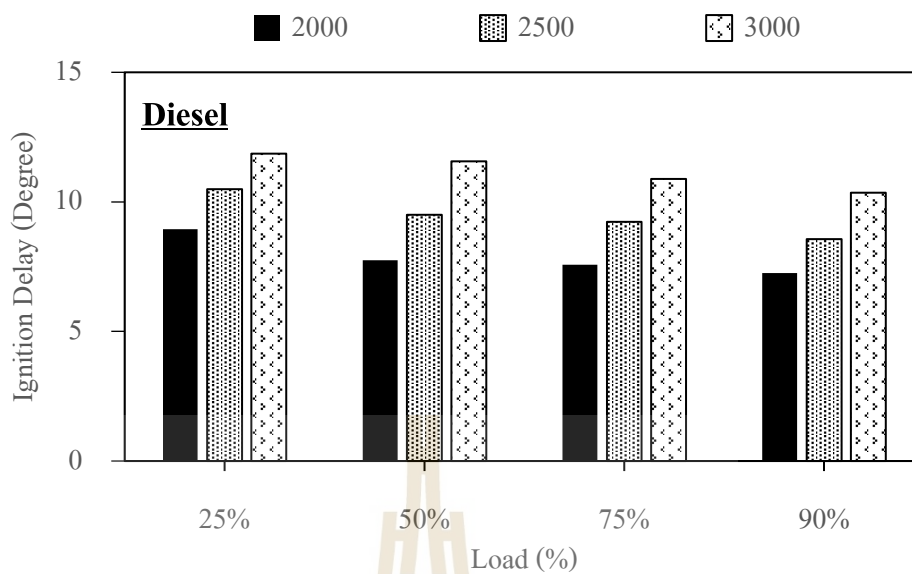
รูปที่ ๑.1 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของแต่ละน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบ

(a) 2,000 rpm (b) 2,500 rpm (c) 3,000 rpm

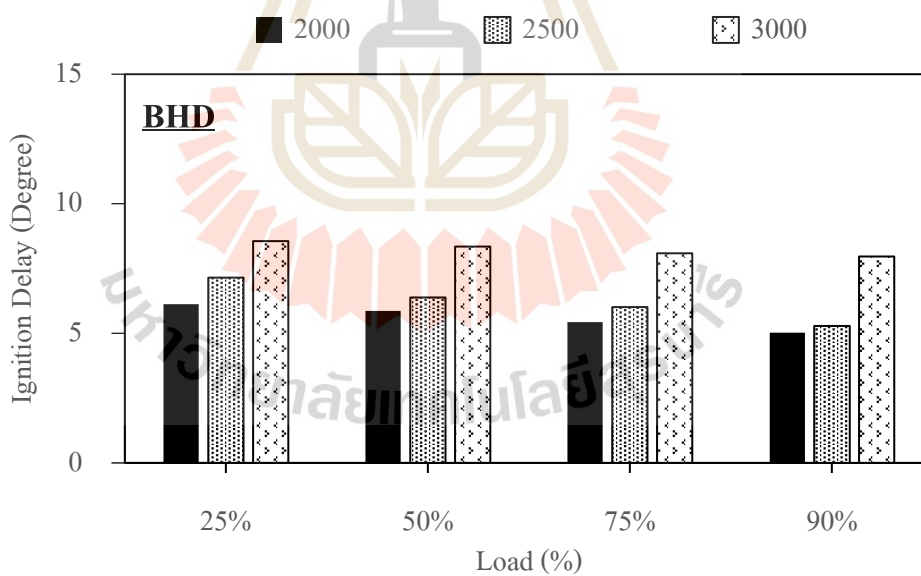
ภาคผนวก ด

ความล่าช้าในการจุติระเบิดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน

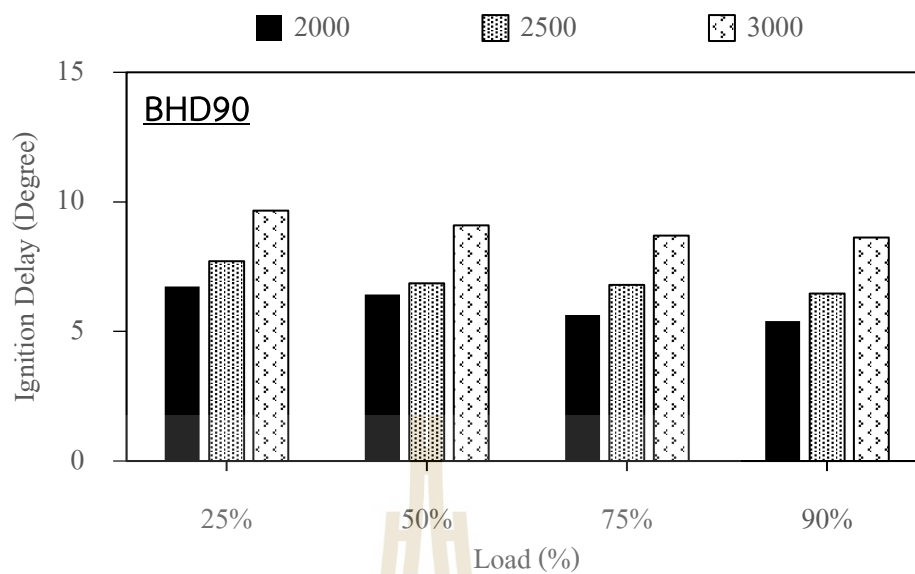




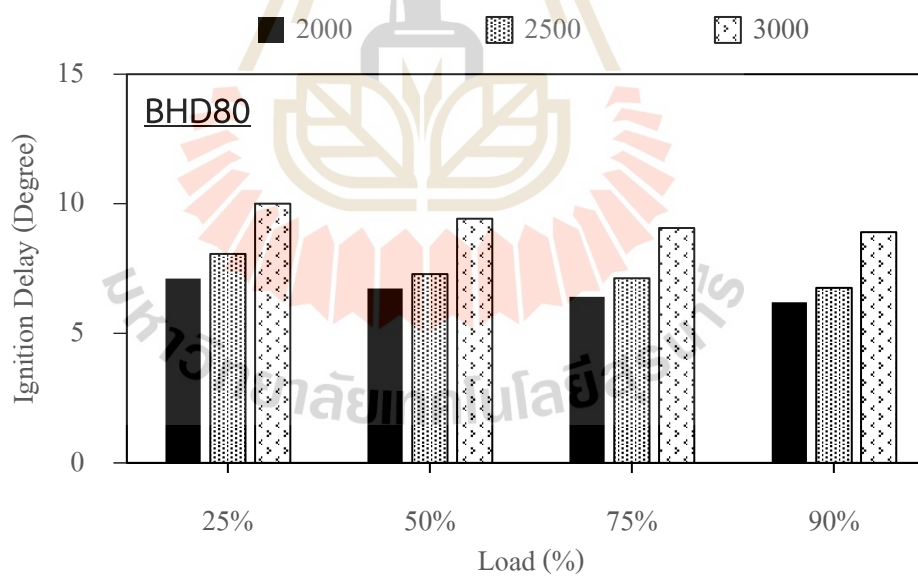
รูปที่ ๓.2 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของแต่ละน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบแตกต่างกันของน้ำมันดีเซล



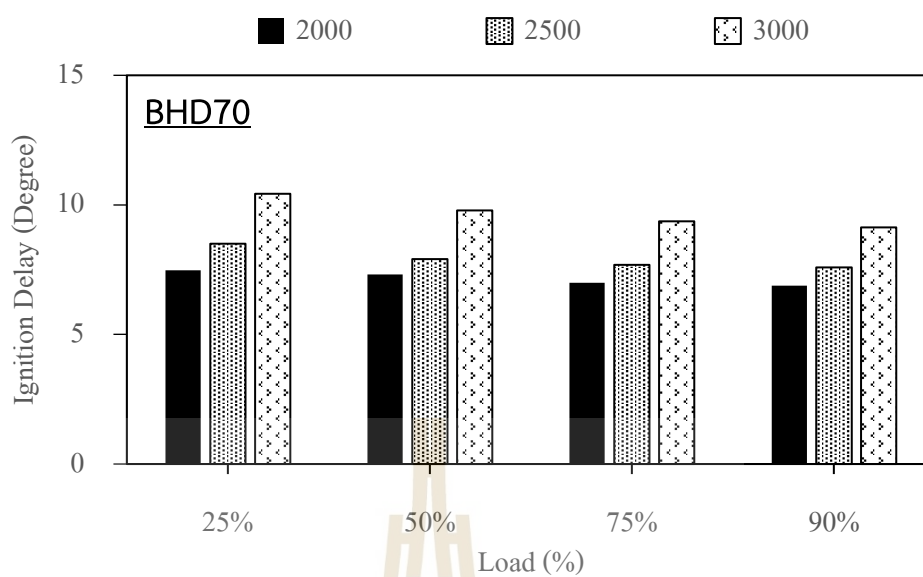
รูปที่ ๓.3 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของแต่ละน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบแตกต่างกันของน้ำมัน BHD



รูปที่ ๔.4 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของแต่ละน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบแตกต่างกันของน้ำมัน BHD90



รูปที่ ๔.5 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของแต่ละน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบแตกต่างกันของน้ำมัน BHD80



รูปที่ ๖.6 ความล่าช้าในการจุดระเบิดเทียบกับโหลดของแต่ละน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบแตกต่างกันของน้ำมัน BHD70

ภาคผนวก ต

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

- Klinkaew, N., Wiangkham, A., Ariyarit, A., Aengchuan, P., Pumpuang, A., Sripratum, S., Maneedaeng, A., Srisertpol, J., & Sukjit, E. (2024). Strategic optimization of engine performance and emissions with bio-hydrogenated diesel and biodiesel: A RVEA-GRNNs framework, *Results in Engineering*, Volume 24, 2024, 103072, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103072>.
- Klinkaew, N., Pumpuang, A., Maneedaeng, A., & Sukjit, E. (2024). Assessment of Bio-Hydrogenated Diesel and Its Blends with Biodiesel as Alternative Fuels: A Study on Engine Emissions and Particle Characteristics. *International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET2024)*, Shanghai, China, August, 12-14, 2024
- Sriprathum, S., Maneedaeng, A., Klinkaew, N., & Sukjit, E. (2023). Comprehensive analysis of properties of green diesel enhanced by fatty acid methyl esters. *RSC Advances*. 13. 31460-31469. 10.1039/D3RA06492A.





Strategic optimization of engine performance and emissions with bio-hydrogenated diesel and biodiesel: A RVEA-GRNNs framework

Niti Klinkaew^a, Attasit Wiangkham^b, Atthaphon Ariyarat^a, Prasert Aengchuan^c, Anupap Pumpuang^d, Sarunporn Sripratum^c, Atthaphon Maneedaeng^c, Jiraphon Srisertpol^a, Ekarong Sukjit^{a,*}

^a School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

^b Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120, Thailand

^c School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

^d Institute of Research and Development, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

^e School of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

ABSTRACT

This study investigates the effects of blending bio-hydrogenated diesel and biodiesel on engine performance and emissions across various engine speeds (2000–3000 rpm) and loads (25–90 %), addressing the growing demand for sustainable transportation fuels. Using a single-cylinder diesel engine from POLAWAT ENGINE Company Limited, we evaluated different bio-hydrogenated diesel and biodiesel blends, optimizing their composition through the Reference Vector Guided Evolutionary Algorithm with a surrogate objective function via Generalized Regression Neural Networks. Results indicate that engine performance is closely linked to combustion temperature, which significantly affects fuel consumption and thermal efficiency. Bio-hydrogenated diesel demonstrated superior performance compared to conventional diesel, with lower fuel consumption and higher thermal efficiency, attributed to its higher cetane index (78 vs. 56) and heating value (47.02 MJ/kg vs. 43.48 MJ/kg). However, increasing biodiesel content in blends tended to increase fuel consumption and decrease efficiency due to biodiesel's lower heating value (39.62 MJ/kg) and higher viscosity (5.16 cSt vs. 2.58 cSt for bio-hydrogenated diesel). Emission analysis revealed that bio-hydrogenated diesel generally produced lower hydrocarbon, carbon monoxide, and smoke emissions than conventional diesel, though nitrogen oxide emissions were slightly higher. Biodiesel blends often showed increased emissions, particularly at higher blend ratios, due to poor fuel atomization. The Generalized Regression Neural Networks model demonstrated high accuracy in predicting engine performance and emissions, with coefficient of determination (R^2) values exceeding 0.98 and mean absolute percentage errors below 5 %. Optimization results indicated that bio-hydrogenated diesel ratios centered around 90 % provided the best balance of performance and emissions. This research bridges critical gaps in combined bio-hydrogenated diesel and biodiesel usage and artificial intelligence-driven biofuel optimization, providing valuable insights for practical implementation in Thailand's agricultural sector.

List of abbreviations

(continued)

AEDP	Alternative Energy Development Plan	HC	Hydrocarbons
AI	Artificial Intelligence	HHV	Higher Heating Value
ANOVA	Analysis of Variance	HR	Heat Release Rate
BIHD	Bio-Hydrogenated Diesel	HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption	ICP	In-Cylinder Pressure
BTE	Brake Thermal Efficiency	MAPE	Mean Absolute Percentage Error
CO	Carbon Monoxide	MOEA/D	Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition
EAs	Evolutionary Algorithms	NOx	Nitrogen Oxides
FAME	Fatty Acid Methyl Esters	NSGA-III	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III
GA	Genetic Algorithm	PCP	Parallel Coordinates Plot
GC/MS	Gas Chromatography/Mass Spectrometry	PM	Particulate Matter
GRNNs	Generalized Regression Neural Networks	RBEN	Radial Basis Function Network
GTL	Gas-to-Liquid	RPM	Revolutions Per Minute
		RVEA	Reference Vector Guided Evolutionary Algorithm

(continued on next column)

* Corresponding author.

E-mail address: ekarong@sut.ac.th (E. Sukjit).

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103072>

Received 18 May 2024; Received in revised form 4 September 2024; Accepted 5 October 2024

2590-1230/© 2024 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Assessment of Bio-Hydrogenated Diesel and Its Blends with Biodiesel as Alternative Fuels: A Study on Engine Emissions and Particle Characteristics

Niti KLINKAEW¹, Anupap PUMPUANG², Atthaphon MANEEDAENG³, Ekarong SUKJIT¹

¹ School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

² Institute of Research and Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ School of Chemical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand
ekarong@sut.ac.th

Abstract: This study examines the influence of diesel, bio-hydrogenated diesel (BHD), and biodiesel fuels on engine performance, combustion characteristics, and emissions across various engine loads. Fuel properties were evaluated according to American Society for Testing and Materials (ASTM) standards, with blends of BHD and biodiesel at different ratios analysed. Engine performance parameters, combustion characteristics, and emissions were measured using specialized instruments, including pressure sensors and gas analysers, across engine loads from 25% to 90%. Results demonstrate that BHD generally outperforms diesel and biodiesel in terms of brake specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE), particularly at higher engine loads. Combustion characteristics such as the rate of heat release (RoHR) and in-cylinder pressure (ICP) varied with fuel type and load, indicating the importance of combustion stability and fuel-air mixing. Emissions analysis reveals trends in NO_x, HC, CO, and smoke emissions, with BHD showing lower emissions compared to diesel and biodiesel under certain conditions. Additionally, exhaust particle distributions, analysed using an Engine Exhaust Particulate Sizer Spectrometer (EEPS), provided insights into particulate matter (PM) characteristics. Thermogravimetric analysis (TGA) reveals that soot from BHD and biodiesel is more readily oxidized and undergoes decomposition at lower temperatures compared to diesel fuel, contributing to our understanding of fuel effects on engine performance and emissions for future fuel formulation and combustion optimization strategies.

Keywords: Bio-hydrogenated diesel, green diesel, PM distribution, Biofuels, Diesel particulate matter

Cite this: *RSC Adv.*, 2023, 13, 31460

Comprehensive analysis of properties of green diesel enhanced by fatty acid methyl esters†

Sarunporn Sriprathum,^a Atthaphon Maneedaeng,^{*a} Niti Klinkaew^b
and Ekarong Sukjit^{†b,c}

This study systematically investigates the lubricating properties of bio-hydrogenated diesel (BHD), a synthetic diesel produced through biomass hydrogenation of vegetable oil. Despite having similar chemical properties to petroleum diesel, BHD has poor lubricating properties due to the removal of sulfur and oxygenated compounds during the hydrogenation process, which could damage the engine. To address this issue, fatty acid methyl esters (FAME) was added as an additive to BHD to enhance its fuel and lubricating properties. FAME is a polar molecule with good lubricating properties that adsorb on the surface to protect against wear. The study found that adding as little as 5% FAME significantly improved the lubricating properties of BHD. The wear scar diameter (WSD) decreased from 609 μm to 249 μm , and the average film was 94% with an average coefficient of friction of 0.138 by only 5% FAME addition investigated by High Frequency Reciprocating Rig with ISO 12156-1: 2018. This shows that blending FAME with BHD could reduce engine wear and improve its lubricating properties. Disc samples were analyzed using a Scanning Electron Microscope (SEM), OLS5100 3D laser microscopy, and Fourier Transform Infrared Microscopy (FTIR) to examine the worn surface both physically and chemically. An increase in the percentage of FAME addition to BHD resulted in a smoother worn surface, exhibiting reduced delamination and debris compared to pure BHD. This effect was attributed to the protective film formed by FAME. The study highlights the potential of FAME as an additive to enhance the lubricating properties of BHD and reduce engine wear.

Received 23rd September 2023

Accepted 23rd October 2023

DOI: 10.1039/d3ra06492a

rsc.li/rsc-advances

1. Introduction

Air pollution presents a pressing challenge that jeopardizes human health and environmental well-being. Particulate matter with a diameter less than 2.5 microns (PM_{2.5}) poses a grave threat as it can infiltrate the respiratory system, causing respiratory ailments, allergies, and even lung cancer.¹ A significant contributor to air pollution is the incomplete combustion of fossil fuels, leading to the emission of carbon monoxide due to engine and fuel injector wear.² Additionally, industrial activities exacerbate the issue by releasing pollutants into the atmosphere. The ramifications of air pollution extend beyond human health, with far-reaching impacts on global warming stemming from greenhouse gas emissions. Consequently, urgent action is imperative to combat air pollution.

Transitioning to renewable and alternative energy sources is a pivotal step in reducing emissions.

Bio-hydrogenated diesel (BHD) emerges as a promising synthetic green diesel, offering an environmentally friendly alternative energy solution.³ Derived from vegetable oils and fats through hydrogenation, BHD undergoes a catalytic transformation that yields a molecular structure akin to conventional diesel fuel, encompassing long-chain hydrocarbons (C₁₄H₃₀–C₁₆H₃₄). The advantages of BHD are manifold, including a higher cetane number, lower sulfur content, and cleaner energy profile, resulting in a potential reduction of up to 9% in nitrogen oxide (NO_x) emissions and 32% in particulate matter (PM) emissions.^{4,5} Notwithstanding its merits, BHD exhibits room for enhancement in specific aspects, particularly its lubrication properties. The lubrication properties of BHD do not meet the standards set by national and international regulations, as indicated by a limited wear scar diameter of 460 μm . Inadequate lubrication can have detrimental effects on engine wear. Recent advancements demonstrate the efficacy of blending ultra-low sulfur diesel with fatty acid methyl esters (FAME) derived from rapeseed to enhance the lubrication of Swedish diesel fuel MK1.⁶ A similar approach involving BHD blending has the potential to enhance vehicle performance and curtail emissions; however, this blending is constrained by

^aSchool of Chemical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand. E-mail: atthaphon@sut.ac.th

^bInstitute of Research and Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

^cSchool of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

† Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: <https://doi.org/10.1039/d3ra06492a>



ประวัติผู้เขียน

นายนิติ กลิ่นแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2537 ณ จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิบูลมังสาหาร อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี ในปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 และได้รับทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2563 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท ในระหว่างเรียนได้เป็นผู้ช่วยสอนรายวิชาเขียนแบบทางกลและวิชาปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมเครื่องกล และในปีเดียวกันได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอกสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ในระหว่างการศึกษาได้รับทุนสนับสนุนจากคณาจารย์ที่มีผลผลิตด้านวิจัยสูงเพื่อจ้างนักวิจัยเต็มเวลา คุณวุฒิปริญญาโท (Full-Time Master Researcher) ตั้งแต่ปี 2563 จนถึงปี 2566 และได้มีโอกาสเป็นผู้สอนในรายวิชาการเขียนแบบวิศวกรรมและรายวิชาเขียนแบบทางไฟฟ้าหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี