



การศึกษาผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นจากการใช้น้ำมัน แก๊สโซฮอล์ 95 เป็นเชื้อเพลิง

The Study on the Effects of Lubricant using Gasohol 95 as Fuel

ชัยยศ ดำรงกิจโกศล¹ และเนรมิต กระแสร์ลม²

Chaiyot Damrongkijkosol¹ and Neramit Krasaelom²

¹⁻² วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

College of Industrial Technology King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Corresponding Author: E-mail: chaiyot.d@citkmtnb.ac.th

Received: 4 มี.ค. 65 Revised: 6 พ.ค. 65 Accepted: 14 มิ.ย. 65

DOI: 10.14416/j.ted.2024.06.015

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นจากการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เป็นเชื้อเพลิง โดยนำเครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก 4 จังหวะ สูบเดียว ติดตั้งเข้ากับอัลเทอร์เนเตอร์ที่ต่อกับภาระทางไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่เป็นภาระการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ทดสอบตามมาตรฐาน 200-hr. screening test for alternative fuels (EMA 200 hours test) โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ก่อนทำการทดสอบ และหลังทำการทดสอบที่ 20 ชั่วโมง 100 ชั่วโมง และ 200 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อนำไปศึกษาผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

ผลการทดสอบพบว่า น้ำมันหล่อลื่นที่ 200 ชั่วโมง พบปริมาณความชื้น เหม่า ค่าออกซิเดชัน และค่าไนเตรชันมากกว่าชั่วโมงการทำงานอื่น โดยปริมาณความชื้นและเหม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นมีปริมาณเท่ากับ 0.145%wt และ 0.3%wt ตามลำดับ ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ควบคุม และพบค่าออกซิเดชัน และไนเตรชันที่สูงกว่าเกณฑ์ควบคุม ขณะที่น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานที่ 100 ชั่วโมง มีปริมาณเหล็กและอลูมิเนียมมากกว่าชั่วโมงทำงานอื่นโดยมีปริมาณเท่ากับ 84.155 ppm และ 74.495 ppm ตามลำดับ ซึ่งปริมาณความชื้น และเหม่าที่เพิ่มขึ้นไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นและเครื่องยนต์เนื่องจากยังอยู่ในเกณฑ์ควบคุม ขณะที่ค่าออกซิเดชัน และไนเตรชันที่สูงเกินเกณฑ์ควบคุมจะให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ ส่งผลทำให้เครื่องยนต์เกิดการสึกหรอที่มากขึ้น ขณะที่การพบโลหะในน้ำมันหล่อลื่นมากขึ้นทำให้น้ำมันหล่อลื่นสกปรก ส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบขูดขีด

คำสำคัญ: เครื่องยนต์เบนซิน การสึกหรอ น้ำมันหล่อลื่น

Abstract

This research objective was to study the effects on lubricant using Gasohol 95 as the fuel. A small four-stroke one-cylinder gasoline engine was installed with Alternator connected with the electric load, functioning as the engine working load. The engine abrasion was tested according to the Standard 200-Hour Screening Test for Alternative Fuels (EMA 200-Hour Test), by collecting the samples of the engine lubricant before



the test, and after the test at 20, 100 and 200 working hours, respectively, for the lubricant effect study of the engine.

The results revealed that, at the 200 working hours the water content, the soot, oxidation and nitration values of the lubricant were higher than the others. It found that the water content and the soot mixed in the lubricant with the amount 0.145%wt and 0.3%wt respectively, which was all in the control criteria. However, the oxidation and nitration were higher than the control criteria. For the metal amount, it was found that, at 100 working hours, the quantity of iron and aluminum in the lubricant was 84.155 ppm and 74.495 ppm respectively which was higher than the others working hour. For the effect on the engine, the increasing of water content and the soot rarely affected to the lubricant and engine because the amount of both water content and soot were still under the control criteria. However, the oxidation and nitration which were higher than the control criteria could deteriorate the lubricant causing the engine wear. Moreover, the metal in lubricant could cause the abrasive wear to the engine parts.

Keywords: Petrol Engine, Wear, Lubricant

1. บทนำ

ปัญหาในด้านพลังงานและเชื้อเพลิงเป็นปัญหาที่สำคัญในปัจจุบันที่ทุกประเทศกำลังประสบอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยซึ่งมีแหล่งทรัพยากรธรรมชาติด้านพลังงานและเชื้อเพลิงน้อยจึงทำให้มีการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อทดแทนพลังงานและเชื้อเพลิงที่ใช้น้อยในปัจจุบัน สิ่งที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบันก็คือเชื้อเพลิงเอทานอล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรที่มีอยู่ในปริมาณที่มากภายในประเทศ การนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในนั้นเท่าที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าส่วนมากจะใช้แบบผสมกับแก๊สโซลีนหรือดีเซลในอัตราส่วนตั้งแต่ 10-35% ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องยนต์เดิมได้โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์แต่อย่างใด และไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ [1] แต่จะส่งผลให้ความร้อนสะสมของเครื่องยนต์ที่มากขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันของการใช้กลุ่มสารออกซิเจนเนตที่ผสมในน้ำมันเชื้อเพลิง จึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์มีอุณหภูมิที่มากขึ้น ทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ที่ต่างจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงปกติ จากการศึกษพบว่าการผลิตน้ำมันกลุ่มแก๊สโซฮอล์นั้นใช้เอทานอล

เป็นส่วนผสมหลักในการผลิตแก๊สโซฮอล์ 95 แก๊สโซฮอล์อี 85 และแก๊สโซฮอล์อี 20 โดยกลุ่มสารออกซิเจนเนตนั้นช่วยเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซินและสารออกซิเจนเนตมีกลไกในการลดเขม่า จากการเกิดกระบวนการทางธรรมชาติในการย่อยสลายและการแตกตัวด้วยความร้อนดังนั้น จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาและทดสอบการสึกหรอเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ สูบเดียว โดยจัดทำชุดทดสอบการสึกหรอ เพื่อศึกษาการสึกหรอของเครื่องยนต์เบนซิน โดยทดสอบน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ โดยใช้เครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะ สูบเดียว โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน 200-hr. screening test for alternative fuels, EMA 200 hours test [2] เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาข้อมูลผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ และสามารถนำชุดทดสอบมาเป็นแนวทางในการทดสอบการใช้เชื้อเพลิงทดแทนในอนาคต

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว จากการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เป็นเชื้อเพลิง

2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำมันเครื่องยนต์ต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์เบนซิน



3. วธการดําเนนการววจย

การจัดทําชุดทดสอบการศกหอร และการทดสอบการศกหอรเครื่องยนต์เบนซน 4 จังหวะ สบเดยว มวตลประสงค เพอศกษาผลกระทบต่อการศกหอรของเครื่องยนต์จากการใชําน้ำมันแกสโซล 95 เปนเชอเพลิง โดยใชการทดสอบตามมาตรฐาน 200-hr. screening test for alternative fuel ซงเปนมาตรฐานที่กําหนดโดย The Alternative Fuel Committee of the Engine Manufacture's Association ;

EMA-1982 [2] โดยทดสอบกบเครองยนต์เบนซน 4 จังหวะ สบเดยว ขนาดเลกคดงนั้ันซ้ันตอนในการดําเนนงานเพอการทดสอบการศกหอรตามมาตรฐาน EMA 200-hours test สามารถแบงไดเปน 4 หัวขอดงนั้

3.1 เครองยนต์เบนซนขนาดเล็ก 4 จังหวะ สบเดยว ที่นํามาใชทดสอบการศกหอรมีรายละเอียดของเครองยนต์ดงแสดงในตารางที่ 1

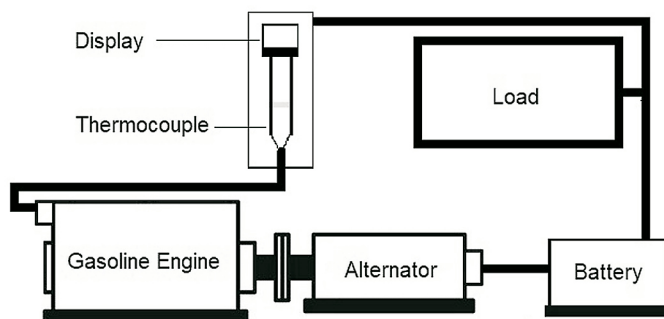
ตารางที่ 1 ขอมูลทางเทคนิคของเครองยนต์เบนซนขนาดเล็ก 4 จังหวะ สบเดยว

ขอมูลทางเทคนิคของเครองยนต์	
Engine Type	4-stroke, OHV, 25°, single-cylinder, force air cooled
Bore x stroke (mm)	60 x 42
Rate power [kW/(r/min)]	2.4/3600
Max.torque [Nm/(r/min)]	5.7/2500
Displacemmt (ml)	118
Staring type	Pull-kick with hand
Ignition type	Induction ignition
Lubricating type	Splashing
Fuel consumption [g/kWh]	≤420
Dry weight (kg)	13
Dimension (L x W x H) (mm)	415 x 380 x 390

3.2 การดัดดงเครองยนต์กบอุปกรณ์ต่าง ๆ เพอเตรยมการทดสอบการศกหอร

1) ทําการดัดดงเครองยนต์ที่ใชในการทดสอบกบภาระการทำงานของเครองยนต์เขากบอัลเทอร์เนเตอร เพอใชเปน

ภาระต่อการทำงานของเครองยนต์และดัดดงอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เทอร์โมคัปเปิล แบตเตอร และโหลดไฟ (Load) ตามแผนผังที่แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังชุดทดสอบการศกหอรเครองยนต์เบนซน 4 จังหวะ สบเดยว

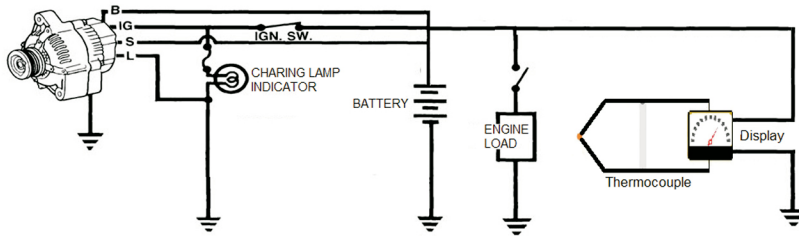


บทควาณวิจัย

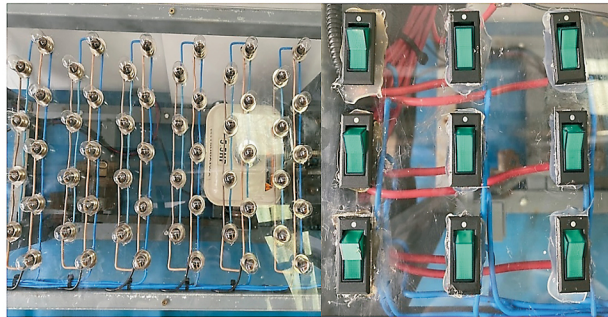
การศึกษาผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นจากการใช้น้ำมันแก๊สโซล 95 เป็นเชื้อเพลิง

2) ทำการติดตั้งชุดภาระต่อการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์ โดยใช้หลอดไฟชนิดหลอดไส้เป็นภาระของอัลเทอร์เนเตอร์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ถูกผลิตจากอัลเทอร์เนเตอร์จะถูกนำไปใช้ในการเปิดหลอดไฟ เพื่อเป็นภาระต่อการทำงานของเครื่องยนต์

เบนซิน โดยมีสวิตช์ควบคุมการเปิด-ปิด ของหลอดไฟ ตามแผนผังที่ 2 และจัดทำชุดภาระต่อการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์ดังภาพที่ 3

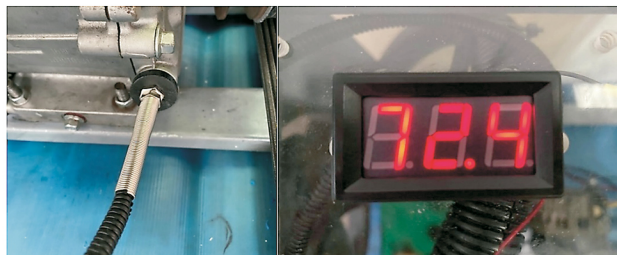


ภาพที่ 2 แผนผังภาระต่อการทำงานของอัลเทอร์เนเตอร์



ภาพที่ 3 หลอดไฟที่ต่อเพื่อเป็นภาระของการทำงานของเครื่องยนต์

3) ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล และเครื่องวัดอุณหภูมิ ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น

3.3 วิธีการทดสอบการสึกหรอหรือเครื่องยนต์การทดสอบ durability test หรือการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ อ้างอิงมาตรฐาน 200-hr screening test for alternative fuels, EMA 200 hours test [2] เป็นมาตรฐานการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทางเลือก (alternative fuel)

โดยหน่วยงาน The Alternative Fuels Committee of the Engine Manufacturer's Association (1982) ของประเทศสหรัฐอเมริกาหรือเรียกว่า EMA 200-hours test โดยการทดสอบได้กำหนดรูปแบบของภาระงานหรือโหลด (Load) เป็นลักษณะ duty cycle ดังแสดงในตารางที่ 2



ซึ่งแบงการทดสอบเปนช่วง ช่วงละ 3 ชั่วโมง ในแตละช่วง จะประกอบด้วยการทดสอบดังนี้

1) อุ่นเครื่องยนต์โดยเดินเบาที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยใหมีภาระของเครื่องยนต์เทากับศูนย์หรือต่ำสุด แล้วคงสภาวะดังกล่าวจนอุณหภูมิเครื่องยนต์ขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส

2) เดินเครื่องยนต์ที่กําลังสูงสุด (Rate power) ที่รอบเริ่มต้น 3,600 รอบต่อนาที เปนเวลา 60 นาที

3) เดินเครื่องยนต์ที่กําลัง 95% (Power) ที่รอบ

เครื่องยนต์ 85% (3,060 รอบต่อนาที) เปนเวลา 60 นาที

4) เดินเครื่องยนต์ที่กําลัง 25% (Power) ที่รอบ

เครื่องยนต์ 90% (3,240 รอบต่อนาที) เปนเวลา 30 นาที ปรับรอบเครื่องยนต์ลงมาที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยใหมีภาระของเครื่องยนต์เทากับศูนย์หรือต่ำสุด เปนเวลา 30 นาที

5) โดยทำการทดสอบซ้ำตอเนื่อง 18 ชั่วโมง (6 cycle) และหยุดพัก 6 ชั่วโมง เพื่อใหเครื่องยนต์มีอุณหภูมิเทาบรรยากาศ และทำการทดสอบซ้ำและตอเนื่องจนครบ 200 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 แผนการทดสอบความทนทานของเครื่องยนต์ตามมาตรฐาน EMA 200-hour test

Cycle step	Engine speed (rpm)	Torque	Power	Time (min)
1	Rated	-	Rated	60
2	85	Maximum	95	60
3	90	28	25	30
4	Low Idle	0	0	30
Total				180

3.4 การศกษาการสึกหรอของเครื่องยนต์ จากน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

1) เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ ก่อนทำการทดสอบ ในช่วงรันอินที่ 20 ชั่วโมงแรก 100 ชั่วโมง และหลังการทดสอบ 200 ชั่วโมง ตามลำดับ ตามคู่มือการใช้งาน

ของเครื่องยนต์ที่ได้กำหนดไว้คือ ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ทุก ๆ 6 เดือน หรือ 100 ชั่วโมง

2) ตรวจวัดผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่น โดยทดสอบตามรายการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ และมาตรฐานที่ใช้ทดสอบ

รายการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์	ASTM
ค่าปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Water Content)	D95/D1744
ค่าการสึกหรอของโลหะ (Wear Metals)	D6595
ค่าออกซิเดชัน (Oxidation)	D7414
ค่าไนเตรชัน (Nitration)	D7624
ค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Soot)	E2412M

4. ผลการวิจัย

จากการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์จากการใช้น้ำมันแกสโซล 95 เปนเชื้อเพลิง ทำให้ทราบผลกระทบในส่วคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานในช่วง

รันอินที่ 20 ชั่วโมง 100 ชั่วโมง และ 200 ชั่วโมง ตามลำดับ จากการใช้น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มาตรฐาน 15W 40 ในปริมาตร 0.3 ลิตร โดยแบ่งได้เปนสองหัวได้ผลการทดสอบดังนี้



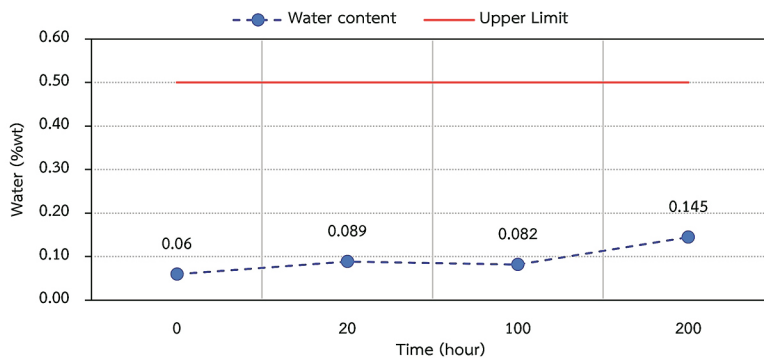
บทควาณวิจัย

การศึกษาผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นจากการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เป็นเชื้อเพลิง

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ที่ผ่านการใช้งาน จากการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เป็นเชื้อเพลิง

1) ค่าปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในน้ำหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Water Content) เป็นการหาปริมาณความชื้นและน้ำ (Water content)

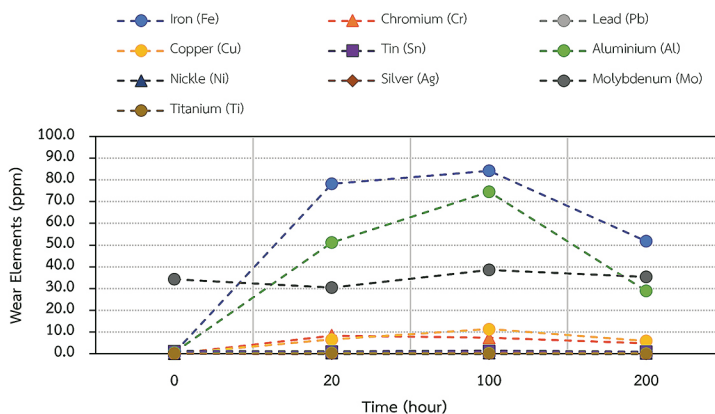
ในน้ำมันหล่อลื่นโดยอาศัยหลักการไตเตรทด้วยกระแสไฟฟ้า หากมีความชื้นและน้ำในน้ำมันหล่อลื่นจะเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนำมาสู่การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นในน้ำมันหล่อลื่น

จากภาพที่ 5 ค่าปริมาณความชื้นตามเกณฑ์ควบคุม Used oil จะต้องไม่มากกว่า 0.50%wt มีค่าเท่ากับความชื้นปริมาณ 200 mg/kg ซึ่งที่ 200 ชั่วโมง มีปริมาณความชื้นมากที่สุด เท่ากับ 0.145%wt โดยมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจากน้ำมันหล่อลื่นใหม่เท่ากับ 0.085%wt คิดเป็นค่าความเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ (Relative Change) เท่ากับ 141.67% และปริมาณความชื้นที่ 200 ชั่วโมงดังกล่าวยังคงต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Upper limit) ไว้ที่ 0.50%wt เท่ากับ 0.355%wt

2) ค่าการสึกหรอของโลหะ (Wear Metals) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (เช่น เหล็ก ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล โครเมียม ฯลฯ) ที่ปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น เพื่อเป็นการหาแนวโน้มที่จะมีปริมาณโลหะปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้น ปริมาณโลหะจะบ่งบอกถึงการสึกหรอที่เกิดขึ้นภายในเครื่องจักรการปนเปื้อนจากภายนอก รวมถึงโลหะที่เป็นสารประกอบของสารเพิ่มคุณภาพด้วย ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลการทดสอบการสึกหรอของโลหะ



ตารางที่ 5 โลหะหลักที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ [3]

Parts of engine	Metal type
Cylinder	Fe
Piston	Al, Si, Fe, Cu
Piston Pin	Cr, Fe, Si, Cu
Piston Ring	Cr, Fe, Si
Crank Shaft	Fe, Cr, Si
Cam Shaft	Fe, Si
Bearing	Cu, Pb

จากตารางที่ 5 แสดงชนิดของโลหะหลักที่เป็นส่วนประกอบเครื่องยนต์ โดยปริมาณโลหะที่เกิดจากการสึกหรอต่างกัว่าอยู่ในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ทำให้ทราบหรือคาดคะเนจะมีเกณฑ์ควบคุมปริมาณของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่แตกต่างกันแหล่งที่มาของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ตรวจพบจากสารหล่อลื่น ดังแสดงในตารางที่ 6 ตามภาพที่ 6 ว่าเกิดจากการสึกหรอของชิ้นส่วนใดของ

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบปริมาณโลหะจากการสึกหรอกับเกณฑ์ควบคุม

ชนิดธาตุ	จำนวนอนุภาคเฉลี่ย (ppm)				เกณฑ์ควบคุม (ppm)	ระดับการสึกหรอ
	ช่วงโม่การทดสอบ					
	0	20	100	200		
Fe	0.425	78.175	84.155	51.735	> 600	ปกติ
Al	0.59	51.145	74.495	28.925	20 - 75	ปกติ
Pb	0.395	0.765	0.715	0.635	< 25	ปกติ
Cu	0.06	6.565	11.35	5.83	50 - 75	ปกติ
Cr	0.06	8.365	7.36	4.765	< 30	ปกติ
Sn	1.245	1.065	1.38	0.985	< 30	ปกติ

หมายเหตุ : ปริมาณเกณฑ์ควบคุมของโลหะชนิดต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้ [3]

ระดับการสึกหรอผิดปกติของ Fe มากกว่า 600 ppm

ระดับการสึกหรอปกติของ Al อยู่ระหว่าง 20 ppm ถึง 75 ppm

ระดับการสึกหรอปกติของ Pb น้อยกว่า 25 ppm

ระดับการสึกหรอปกติของ Cu อยู่ระหว่าง 50 ppm ถึง 75 ppm

ระดับการสึกหรอปกติของ Cr น้อยกว่า 30 ppm

ระดับการสึกหรอปกติของ Sn น้อยกว่า 30 ppm



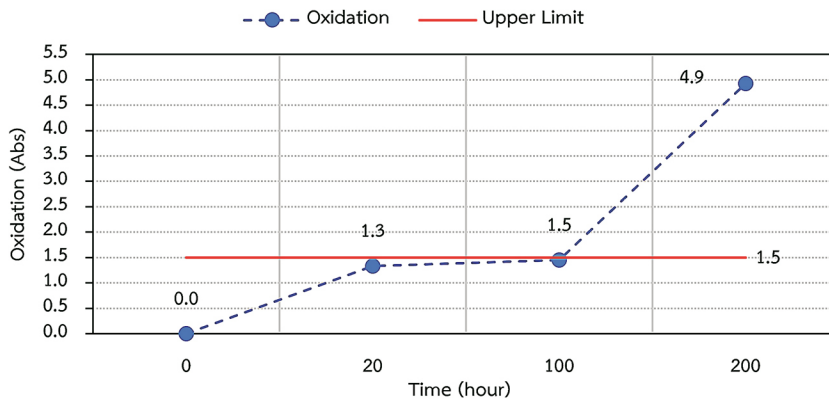
บทควาณวิจัย

การศึกษาผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นจากการใช้น้ำมันแก๊สโซลีน 95 เป็นเชื้อเพลิง

จากตารางที่ 6 ปริมาณโลหะปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการทดสอบที่ 100 ชั่วโมง มีค่าปริมาณโลหะแต่ละชนิดเพิ่มมากขึ้นสูงที่สุดโดยพบว่า เหล็ก (Fe) เพิ่มขึ้นร้อยละ 197.01 อะลูมิเนียม (Al) เพิ่มขึ้นร้อยละ 125.26 ตะกั่ว (Pb) เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.81 ทองแดง (Cu) เพิ่มขึ้นร้อยละ 188.17 โครเมียม (Cr) เพิ่มขึ้นร้อยละ 121.67 และ ดีบุก (Sn) เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.11 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเครื่องใหม่ อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะทุกชนิดยังคงอยู่ในระดับเกณฑ์ปกติ และจากการทดสอบที่ 200 ชั่วโมงพบว่ามีการสึกหรอของโลหะที่ลดลง

เนื่องจากเครื่องยนต์เกินช่วง Run-in และมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นตามคู่มือที่ได้กำหนดไว้จึงทำให้มีการสึกหรอของโลหะที่ลดลง

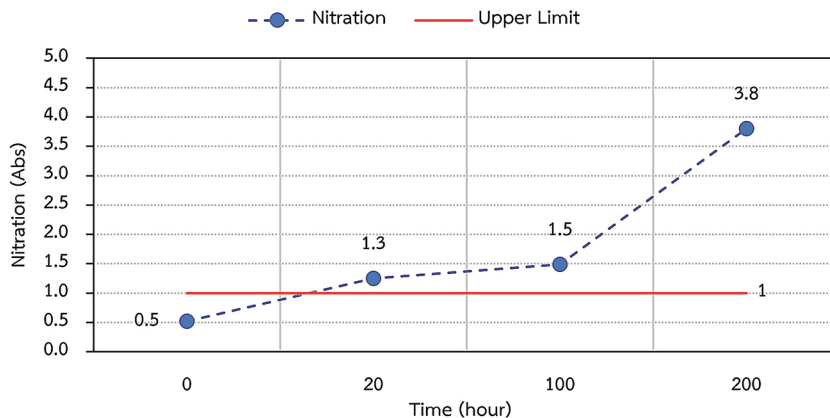
3) ค่าออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นการทดสอบเพื่อหาความเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากปัจจัยเร่งต่าง ๆ ในการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ เช่น ความชื้นในบรรยากาศ อากาศ ความร้อน ฝุ่นผง และสิ่งสกปรกต่าง ๆ โดยมีผลการทดสอบดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบหาค่าออกซิเดชัน (Oxidation)

จากภาพที่ 7 ค่าออกซิเดชันตามเกณฑ์ควบคุม Used oil จะต้องไม่มากกว่า 1.5 Abs ซึ่งที่ 200 ชั่วโมง มีค่าออกซิเดชันมากที่สุดเท่ากับ 4.9 Abs โดยมีค่าออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจากน้ำมันหล่อลื่นใหม่เท่ากับ 4.9 Abs และค่าออกซิเดชันที่ 200 ชั่วโมงดังกล่าวมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Upper limit) ไว้ที่ 1.5 Abs เท่ากับ 3.4 Abs

4) ค่าไนเตรชันเป็นการทดสอบเพื่อหาความเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ซึ่งไนเตรชันเกิดจากปัจจัยเร่งต่าง ๆ ในการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ เช่น ความชื้นในบรรยากาศ อากาศ ความร้อน โดยมีผลการทดสอบดังภาพที่ 8

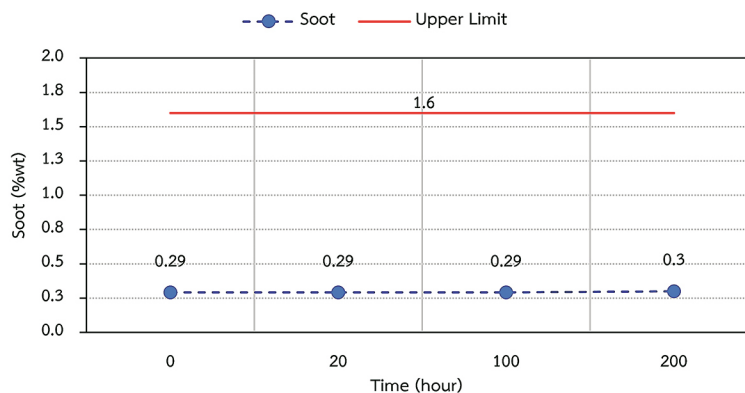


ภาพที่ 8 ผลการทดสอบหาค่าไนเตรชัน (Nitration)

จากภาพที่ 8 ค่าไนเตรชันตามเกณฑ์ควบคุม Used oil จะต้องไม่มากกว่า 1 Abs ซึ่งที่ 200 ชั่วโมง มีค่าไนเตรชันมากที่สุดเท่ากับ 3.8 Abs โดยมีค่าไนเตรชันเพิ่มขึ้นจากน้ำมันหล่อลื่นใหม่เท่ากับ 3.3 Abs คิดเป็นค่าความเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ (Relative Change) เท่ากับ 6.6 % และค่าไนเตรชันที่ 200 ชั่วโมงดังกล่าวมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Upper

limit) ไว้ที่ 1 Abs เท่ากับ 2.8 Abs

5) ค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Soot) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าเขม่าที่เกิดจากอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีค่าสูง การเพิ่มปริมาณของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นแสดงให้เห็นถึงปัญหาจากการเผาไหม้ ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Soot)



บทควาณวิจัย

การศึกษาผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นจากการใช้น้ำมันแก๊สโซลีน 95 เป็นเชื้อเพลิง

จากภาพที่ 9 ค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามเกณฑ์ควบคุม Used oil จะต้องไม่มากกว่า 1.6%wt ซึ่งที่ 200 ชั่วโมง มีค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มากที่สุดเท่ากับ 0.3%wt โดยมีค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจากน้ำมันหล่อลื่นใหม่เท่ากับ 0.01%wt คิดเป็นค่าความเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ (Relative Change) เท่ากับ 3.45% และค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมัน

หล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ 200 ชั่วโมงดังกล่าวยังคงต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Upper limit) ไว้ที่ 1 Abs เท่ากับ 1.3%wt

4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเครื่องยนต์ จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ผ่านการใช้งานจากการทดสอบเครื่องยนต์ในช่วงรันอิน 20 ชั่วโมง 100 ชั่วโมง และ 200 ชั่วโมง ตามลำดับ ทำให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเครื่องยนต์

รายการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์	ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่น	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
ค่าปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Water Content)	มีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ควบคุม	ส่งผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่น และเครื่องยนต์ค่อนข้างน้อย
ค่าการสึกหรอของโลหะ (Wear Metals)	พบจำนวนปริมาณ Fe และ Al เป็นจำนวนมากแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ควบคุม	อาจทำให้เกิดการสึกหรอแบบขูดขีด Abrasive wear
ค่าออกซิเดชัน (Oxidation)	เพิ่มขึ้นเกินเกณฑ์ควบคุม	ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นและส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์
ค่าไนเตรชัน (Nitration)	เพิ่มขึ้นเกินเกณฑ์ควบคุม	ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น และส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์
ค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Soot)	มีปริมาณเพิ่มขึ้นแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ควบคุม	ส่งผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่น และเครื่องยนต์ค่อนข้างน้อย

จากตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเครื่องยนต์ พบว่าค่าปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Water Content) พบว่าค่าสูงสุดจากการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ควบคุม จึงส่งผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ค่อนข้างน้อย หากพบในปริมาณมากจะส่งผลให้เป็นปัจจัยเร่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และทำให้เกิดสนิมและการผุกร่อน ซึ่งนำมาสู่การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น [4]

ค่าการสึกหรอของโลหะซึ่งเกิดจากการสึกหรอที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ การปนเปื้อนจากภายนอก รวมถึงโลหะที่เป็นสารประกอบของสารเพิ่มคุณภาพ ทำให้เกิดการสึกหรอ

แบบขูดขีด (Abrasive Wear) ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกหรอต่อไปเรื่อย ๆ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าปริมาณเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียมเป็นจำนวนมากกว่าธาตุอื่น ๆ ธาตุดังกล่าวเป็นธาตุของชิ้นส่วนหลัก ๆ ในเครื่องยนต์ ได้แก่ ชิ้นส่วนของกระบอกสูบ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาลูกเบี้ยว และลูกสูบ เป็นต้น ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติเมื่อนำมาเทียบกับเกณฑ์ควบคุม [4]

ค่าออกซิเดชัน (Oxidation) และค่าไนเตรชัน (Nitration) พบว่าค่าสูงสุดจากการทดสอบมีปริมาณที่มากกว่าเกณฑ์ควบคุม ซึ่งส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ และส่งผลไปยังเครื่องยนต์ซึ่งทำให้ระบบการหล่อลื่นเสื่อมประสิทธิภาพลงไปด้วย [3]



ค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Soot) พบว่าค่าสูงสุดจากการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ควบคุม ซึ่งส่งผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ค่อนข้างน้อย หากพบในปริมาณมากจะส่งผลทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีความสกปรก ซึ่งส่งผลกระทบต่อปั๊มเครื่องยนต์ ทำให้ระบบการหล่อลื่นของเครื่องยนต์นั้นมีประสิทธิภาพลดลง [5]

5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล

จากผลการศึกษาถึงผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นต่อชุดทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะสูบเดียว จากการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เป็นเชื้อเพลิง โดยทำการศึกษาทางด้านผลกระทบต่อการสึกหรอจากการวิเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ โดยใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เป็นเชื้อเพลิง ทดสอบตามมาตรฐาน 200-hr. screening test for alternative fuels, EMA 200 hours test ได้ผลสรุปจากการทดสอบดังนี้

1) การทดสอบหาปริมาณความชื้นในน้ำมันหล่อลื่น (Water Content) จากการทดสอบปริมาณความชื้นน้ำมันหล่อลื่น ไม่พบการปนเปื้อนของความชื้น ซึ่งสรุปได้ว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ขนาดเล็ก ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจึงทำให้มีการปนเปื้อนของความชื้นที่ค่อนข้างน้อย สอดคล้องกับงานของวิชัย ดันติพิมพ์กุล [4] กล่าวว่า เมื่อมีปริมาณความชื้นหรือน้ำในน้ำมันหล่อลื่นในปริมาณมาก จนกลั่นตัวแยกชั้นส่งผลให้เกิดสนิม และการผุกร่อนความชื้นช่วยให้จุลินทรีย์เติบโตได้ ซึ่งจะย่อยไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่น ให้กลายเป็นกรดมีผลในการกัดกร่อนที่รุนแรง เกิดเมือกและตะกอนอุดตันในไส้กรองและวาล์วต่าง ๆ และปัญหานี้จะทวีความรุนแรงขึ้นหากเครื่องจักร ดังกล่าวอยู่ใกล้ชิดกับน้ำ เช่น เครื่องจักรในโรงกระดาษ เครื่องปั่นไฟพลังน้ำ เครื่องยนต์เรือ ฯลฯ แต่เนื่องจากการทดสอบการสึกหรอใช้เครื่องยนต์ที่มีระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ จึงพบความชื้นในปริมาณที่

ค่อนข้างน้อย

2) การสึกหรอของโลหะ (Wear metal) จากการทดสอบการสึกหรอของโลหะ จะพบว่าเศษโลหะจากเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) มีค่าสูงขึ้นกว่าธาตุอื่น ๆ เนื่องจากการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์มีเศษเหล็กและอลูมิเนียมหลุดออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชิ้นส่วนของกระบอกสูบ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาลูกเบี้ยว และลูกสูบ และเป็นที่น่าสังเกตว่าการทดสอบเครื่องที่ 200 ชั่วโมง มีปริมาณการสึกหรอของโลหะที่ลดลง เนื่องจากการสึกหรอที่ปรับตัวเรียบร้อยแล้ว และมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ทุก ๆ 100 ชั่วโมง จึงทำให้เกิดการสึกหรอน้อยกว่าในช่วงรันอิน และ 100 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งอนุภาคการสึกหรอทั้งหมดอยู่ในระดับปกติ สอดคล้องกับงานวิจัยของเนรมิต กระแสร์ลม [3] กล่าวว่า การสึกหรอของโลหะมีค่าเรียงจากมากไปน้อยต่อหน่วยเวลา ซึ่งไปเป็นไปตามวงจรชีวิตของเครื่องจักร (Bathtub-Curve) ซึ่งการสึกหรอยังไม่ถึงช่วงเวลาที่สามของวงจรชีวิต คือช่วงเสื่อมสภาพการใช้งานและมีค่าการสึกหรอที่อยู่ในระดับปกติ

3) การทดสอบหาค่าออกซิเดชัน (Oxidation) พบว่ามีค่ามากกว่าเกณฑ์ควบคุม เนื่องจากน้ำมันเสื่อมสภาพ เพราะมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากปัจจัยเร่งต่าง ๆ ในการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ เช่น ความชื้นในบรรยากาศ อากาศ ความร้อน และสิ่งสกปรกต่าง ๆ สอดคล้องกับบทความในหนังสือเรื่องวิศวกรรมการบำรุงรักษา สุรพล ราษฎร์นัย [6] กล่าวว่า ความร้อนและออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ประกอบที่ไม่ดีต่อน้ำมันหล่อลื่น กระบวนการดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันและสารประกอบที่เกิดขึ้นก็เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นช้า ๆ อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นอย่างไรก็ตามการเกิดการปนกันจนเกิดฟองการฉีกพ่น และการที่มีค่าอุณหภูมิสูง ๆ โดยเฉพาะจุดที่มีความร้อนสูงเพียงจุดเล็ก ๆ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันยิ่งเกิดเร็วขึ้นทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นกรดและทำให้เกิดตะกอน และคราบเหนียว



4) ค่าไนเตรชัน (Nitration) จากผลการทดสอบ ค่าไนเตรชัน (Nitration) พบว่ามีค่ามากกว่าเกณฑ์ควบคุม เนื่องจากน้ำมันเสื่อมสภาพเพราะมีการเกิดปฏิกิริยาไนเตรชัน จากปัจจัยเร่งต่าง ๆ ในการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ เช่น ความชื้นในบรรยากาศ อากาศ ความร้อน สอดคล้องกับงานของ Robinson [5] กล่าวว่าลักษณะการเกิดไนเตรชันจะเกิดที่สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูง เช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชันประกอบกับการมีไนโตรเจนและออกซิเจนอยู่บริเวณรอบ โดยทั่วไปการเกิดไนเตรชันจะอยู่ในรูปของ NO , NO_2 และ N_2O_4 การเกิดไนเตรชันเป็นสาเหตุทำให้เกิดคราบยางเหนียวและ Lacquer สาเหตุของการเกิดไนเตรชันมาจากการปฏิกิริยาร่วมผสมของเชื้อเพลิงต่ออากาศที่ไม่ถูกต้อง การปรับจังหวะการจุดระเบิดที่ไม่เหมาะสมหรือมาจากสภาวะการทำงานที่ภาระสูง ซึ่งจะทำให้เกิดอุณหภูมิการทำงานและปริมาณ blow-by ที่สูงตามไปด้วย

5) การทดสอบหาค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Soot) จากการทดสอบค่าเขม่าที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Soot) พบว่าไม่มีค่าที่เกินเกณฑ์ควบคุม สามารถสรุปได้ว่าปริมาณเขม่าที่พบในน้ำมันหล่อลื่นมีปริมาณที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากในการทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์ ใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกันทั้งหมดคือ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 จึงทำให้ปริมาณเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Robinson [5] กล่าวว่าเขม่าเกิดจากอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีค่าสูงการเพิ่มปริมาณของเขม่าในน้ำมันหล่อลื่นแสดงให้เห็นถึงปัญหาจากการเผาไหม้ หรือช่วงเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องและไส้กรองที่นานเกินไป ปริมาณเขม่าที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดและทำให้เกิดการอุดตันที่ไส้กรองและอ่างน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ทุก ๆ 100 ชั่วโมง ตามที่คู่มือการใช้งานเครื่องยนต์กำหนด จึงทำให้การตรวจวัดผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีค่าการทดสอบบางค่าที่ไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นทำให้คุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นมีประสิทธิภาพ

มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว จึงทำให้เกิดผลกระทบที่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ เช่น น้ำมันเบนซินผสมกับเอทานอลชนิดต่าง ๆ ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 90 ต่อ 10 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงที่ต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อลดการสึกหรอของเครื่องยนต์ และเป็นแนวทางในการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากหลายฝ่าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณชนิษฐา คันชอทอง นักวิทยาศาสตร์ ระดับ 8 หัวหน้าแผนกวิเคราะห์ปิโตรเลียม และคุณกชกร กิตติจิรัฐกาล นักวิทยาศาสตร์ และพนักงาน บุคลากรทุกท่านของแผนกวิเคราะห์ปิโตรเลียม ฝ่ายเคมี การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ได้กรุณานำตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ และให้คำปรึกษาแนะนำข้อเสนอแนะเกี่ยวกับข้อมูลต่าง ๆ ทั้งด้านเทคนิคและทางด้านการทดสอบในการจัดวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณนายเอกรัตน์ แจ่มถิ่นป่า นายพรศพล มนูญพร และนายอภิวัฒน์ พลไทย นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง (เทคโนโลยียานยนต์) ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ช่วยดำเนินการสร้างและทดสอบการสึกหรอของเครื่องยนต์



เอกสารอ้างอิง

- [1] ลิขิต ไสหนู, สมมาส แก้วล้วน, พิชัย อัษฎมงคล. (2548). การศึกษาการสึกหรอเครื่องยนต์ที่ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 1(1) (ปฐมฤกษ์), 14-19.
- [2] EMA. (1982). 200-hour screening test for alternative fuel. Energy News. Peoria, Ill. : Northern Agricultural Energy Center.
- [3] เนรมิต กระแสร์ลม. (2552). การวิเคราะห์ผลกระทบต่อ การสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ สูบเดี่ยว จากการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต บัณฑิต วิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ.
- [4] วิชัย ตันติพิมพ์กุล, ศิวพงษ์ ตั้งสุจริต. (2552). [ออนไลน์]. การปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันหล่อลื่น. [สืบค้นเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม 2565]. จาก <https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/p58-65.pdf>.
- [5] Robinson N, Hons B S. (2000). Monitoring oil degradation with infrared spectroscopy. Wear Check-Techn Bull 18: 1-8.
- [6] สุรพล ราษฎร์นัย. (2545). วิศวกรรมการบำรุงรักษา. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น.