

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๙
9th Conference on Energy Network of Thailand

ขอมอบประกาศนียบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่าบทความวิจัย

เรื่อง

การศึกษาสมรรถนะและมลพิษไอเสียจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า

โดย

กิตติ สถาพรประสาธน์ และ ธวัชชัย เจริญคุณ

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

และได้นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๙

ระหว่างวันที่ ๘-๑๐ พฤษภาคม ๒๕๕๖ ณ ชลพฤกษ์ รีสอร์ท อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก

สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สลิลทิพย์ สินธุสนธิชาติ
รองประธานคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๙

สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด

รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๙



บทความวิชาการ

ฉบับรวมเล่ม

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

9th Conference on Energy Network of Thailand



พลังงานสีเขียวเพื่อโลกที่สดใส Green Energy Brightens Our World

ณ ชลพฤกษ์ รีสอร์ท อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก
8-10 พฤษภาคม 2556

จัดการประชุมโดย
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม: Environmental Managements (EVM)

| รหัสอ้างอิงบทความ | ชื่อบทความ | หน้า |
|-------------------|---|------|
| EVM001 | การลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันไฟโรไลซิสที่ได้จากขยะยางรถยนต์ด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยา | 854 |
| EVM002 | การวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ: กรณีศึกษาตัวอย่างสวนปาล์มน้ำมันและโรงสกัดน้ำมันปาล์มของประเทศไทย | 860 |
| EVM003 | เครื่องวัดและวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และ 10 ในอากาศ | 868 |
| EVM004 | การบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยกระบวนการโอโซน | 876 |
| EVM005 | การประเมินคาร์บอนคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำมันเชื้อเพลิง จากกระบวนการไฟโรไลซิสขยะพลาสติก | 883 |

สาขาพลังงานทดแทน: Renewable Energy (RE)

| รหัสอ้างอิงบทความ | ชื่อบทความ | หน้า |
|-------------------|--|------|
| RE001 | กระบวนการผลิตโซเดียมโบโรไฮไดรด์จากโซเดียมบอแรกซ์เพื่อใช้ในการกักเก็บไฮโดรเจนด้วยการบดโดยบอลมิลล์ร่วมกับการให้ความร้อน | 890 |
| RE002 | โปรตีนเซอร์แก๊สจากแก๊สซิไฟเออร์ชนิดเบดหยุดนิ่งเปลวไฟไหลลงโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบและซีลีเยอร์ร่วมกับไอน้ำ | 898 |
| RE003 | การศึกษาออกแบบบวมโคลม 3 ทิศทาง สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมแบบแกนตั้ง | 904 |
| RE004 | การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเหมาะสมของระบบไฟส่องถนนพลังงานแสงอาทิตย์แบบเกาะเต่า | 910 |
| RE005 | การศึกษาการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการใช้หัวแร้งไฟฟ้าในอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ | 916 |
| RE006 | Experimental Analysis of a Charcoal Downdraft Gasifier and Gasoline with Motorcycle Engine | 922 |
| RE007 | การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้กระถินสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลของกองทัพเรือไทย | 929 |
| RE008 | การพิจารณาค่าส่งสูญเสียและเพิ่มคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยติดตั้ง PV และตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายปฐมภูมิด้วย NSGA-II | 936 |
| RE009 | ศึกษาอิทธิพลของแผ่นกระจายอากาศความเร็วอากาศและปริมาณอนุภาคที่มีผลต่อการหมุนวนของอนุภาคภายในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดชั้นโรงงานต้นแบบ | 942 |
| RE010 | การวิเคราะห์กังหันลมแบบแกนตั้ง | 949 |
| RE012 | การศึกษากระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลเพื่อพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลแบบ Inverted Updraft Gasifiers | 956 |
| RE013 | การป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงสำหรับระบบไฟโตโวลตาอิกแบบบูรณาการร่วมกับอาคาร | 964 |
| RE014 | การผลิตก๊าซสังเคราะห์จากกลีเซอรอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา | 969 |
| RE015 | เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียมสำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ | 976 |
| RE016 | การศึกษามลพิษและมลพิษไอเสียจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า | 980 |
| RE017 | พื้นที่กำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก | 988 |
| RE018 | การวิเคราะห์การทำงานของเตาหุงต้มแบบเหนียวนำความร้อนด้วยจอร์จอินเวอร์เตอร์คลาสอี | 994 |
| RE019 | การออกแบบใบพัดเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม | 1000 |
| RE020 | คุณลักษณะมลพิษอนุภาคไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ | 1006 |
| RE021 | การศึกษาลำดับของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลในระบบหัวฉีดความดันสูง | 1012 |
| RE022 | ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์พิกะชันของปาล์มโอเลอินกับโพพรานอลด้วยคลินอิลตราโซนิค | 1020 |
| RE023 | การเปรียบเทียบระบบการให้ความร้อนในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์พิกะชันจากน้ำมันปาล์ม | 1025 |
| RE024 | การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 10 กิโลวัตต์เข้าสู่ระบบสายส่ง | 1032 |

มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร. สมพร ธเนศวรณิษฐ์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร. กิตติ สถาพรประสาธน์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร. เทพฤทธิ์ ทองซุบ
ดร. กীরติ ขยะกุลศิริ
ดร. วิชชากร เองศรีธวัช
ดร. ชลธิศ เอี่ยมวรวิมลกุล
ดร. วริศรา เลิศไพฑูรย์พันธ์
ดร. นิमित บุญภิรมย์
อ. อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ
อ. เฉเชิญ จันทร์สา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร. ชยุต นันทกุลิต

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. อำไพศักดิ์ ทีบุญญา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์
รศ.ดร. ชินรัชช์ เขียวพงษ์
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข
รศ.ดร. จำลอง ปราบแก้ว
ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร
ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เตไปวา
ดร. ดอน อิศรากร
ดร. วิชาดา เจษฎารัตนชัย
ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์

คณะกรรมการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยทักษิณ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
มหาวิทยาลัยรังสิต
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมรรถนะและมลพิษไอเสียจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า A Study of Performance and Exhaust Emissions form Biodiesel in Diesel Generator

กิตติ สถาพรประสาธน์ และ ธวัชชัย เจริญคุณ*

สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ 10110
*ติดต่อ: Tel: 02 6495000 ต่อ 22034, Fax: 037 322601 E-mail: tawatchai82@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมรรถนะและมลพิษไอเสียจากการใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าเรือ ยี่ห้อ MERCEDES BENZ แบบ OM 421 กำลัง 159 กิโลวัตต์ จำนวน 6 สูบ โดยทำการศึกษาคูณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันไบโอดีเซล แบบเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) ผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ (B0, B5, B10, B15, B20, B25, B50, B75 และ B100) แล้วนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงพบว่า เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและความหนืดของเชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการฉีดเชื้อเพลิงของหัวฉีดลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงด้วย ส่วนผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ลดลงด้วย และผลการทดสอบมลพิษไอเสีย พบว่าเมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น CO, HC และควันดำมีปริมาณลดลง แต่ NO_x มีปริมาณเพิ่มขึ้น

คำหลัก: ไบโอดีเซล / เมทิลเอสเทอร์ / เครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า

Abstract

The purposes of this research were to study performance and exhaust emission from using biodiesel (Methyl Ester) blended with diesel fuel, as fuel in a diesel generator, MERCEDES BENZ OM 421, 159 kW 6-cylinders, On the research, properties of biodiesel were studied at various ratios (B0, B5, B10, B15, B20, B25, B50, B75 and B100) by testing with the engine. The results showed that increase of biodiesel ratio causes density and viscosity of the fuel increase. As a result, the injection nozzle has lower efficiency because of incomplete combustion. In the same way, the performance test showed that fuel consumption and specific fuel consumption of the fuel increased when the ratio of biodiesel is increased, Moreover, due to lower heating value of biodiesel causes thermal efficiency of the engine is reduced. A result of exhaust emission test showed that when the ratio of biodiesel is increased, CO, HC and black smoke are decreased, but the amount of NO_x is increased

Keywords: biodiesel / methyl ester / diesel generator.

1. บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มจำนวนประชากรและอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่ขยายตัว ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่มีความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อการคมนาคมและขนส่งมากที่สุด ปัจจุบันแหล่งพลังงานของประเทศไทยต้องนำเข้าแหล่งพลังงาน

จากต่างประเทศจำนวนมาก เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูป ประกอบกับราคาน้ำมันเชื้อเพลิงสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีความพยายามศึกษาวิจัยและค้นคว้าหาแหล่งพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานทดแทนที่ได้จากผลิตผลทางการเกษตร การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลมีการใช้มาตั้งแต่สมัยสงครามโลก

ครั้งที่ 2 แต่ขณะนั้นน้ำมันจากปิโตรเลียมยังมีราคาถูกและหาได้ง่าย ทำให้น้ำมันพืชไม่ได้รับความสนใจในการใช้แทนน้ำมันดีเซล หลังจากวิกฤตน้ำมันครั้งแรกของโลกในปี พ.ศ. 2514 [1] จึงมีความพยายามหาพลังงานทดแทนมาใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพลังงานหมุนเวียนที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น น้ำมันพืชเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่ได้รับการสนใจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลอีกครั้ง

โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลอัตราส่วนต่างๆ เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าในเรือ ยี่ห้อ MERCEDES BENZ แบบ OM 421 กำลัง 159 กิโลวัตต์ จำนวน 6 สูบ โดยไม่มีการดัดแปลงเครื่องยนต์ เพื่อทำการศึกษามรรถนะ และมลพิษโอเอซีที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

เครื่องยนต์ 4 จังหวะ จะมีลักษณะในการทำงานดังนี้คือ ใน 1 รอบการทำงาน ลูกสูบจะต้องเคลื่อนที่ขึ้น-ลง 4 ครั้ง คือเคลื่อนที่ขึ้น 2 ครั้ง เคลื่อนที่ลง 2 ครั้ง หรือกล่าวได้ว่าเพลวข้อเหวี่ยงหมุน 2 รอบจะได้งาน 1 ครั้ง จังหวะการทำงานจะหมุนเวียนกันเช่นนี้ตลอดไปจนกว่าเครื่องยนต์จะหยุดการทำงาน

2.2 การประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์

2.2.1 กำลังเพลวเบรกของเครื่องยนต์ (Brake Power)

การหาค่ากำลังเพลวเบรก สามารถนำของค่ากระแสไฟฟ้า (I) และค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่จ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มาประมาณหาค่ากำลังเพลวเบรกของเครื่องยนต์ได้ ดังสมการ

$$BP = \frac{\sqrt{3}VICos\theta}{1000} \quad (1)$$

เมื่อ BP คือ กำลังเพลวเบรกของเครื่องยนต์ (kW)

V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (Volt)

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (Amp)

Cos θ คือ แฟคเตอร์กำลัง (Power Factor)

2.2.2 อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

คือการวัดปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในขณะที่เครื่องยนต์ทำงานภายใต้โหลดและความเร็วต่างๆ ต่อเวลา ดังสมการ

$$m_f = \frac{3600 \times V_f \times SG}{1000t} \quad (2)$$

เมื่อ m_f คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

V_f คือ ปริมาตรของน้ำมัน (mm^3)

SG คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิง

t คือ เวลา (Sec)

2.2.3 อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption)

คือ การหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงให้เป็นงานได้

$$SFC = \frac{m_f}{BP} \quad (3)$$

เมื่อ SFC คือ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kW.hr)

m_f คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

BP คือ กำลังเพลวเบรกของเครื่องยนต์ (kW)

2.2.4 กำลังงานเชื้อเพลิง (Fuel Power)

คือการหาค่ากำลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงจากอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

$$FP = m_f \times Q_{HV} \quad (4)$$

เมื่อ FP คือ กำลังงานเชื้อเพลิง (kW)

m_f คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

Q_{HV} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Higher Heating Value) (kJ/kg)

2.2.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Break Thermal Efficiency)

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเครื่องยนต์ส่งออกกับกำลังงานงานที่เกิดจากการสันดาปน้ำมันเชื้อเพลิง

$$\eta_{bb} = \frac{BP}{FP} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ η_{bb} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)

BP คือ กำลังเพลวเบรกของเครื่องยนต์ (kW)

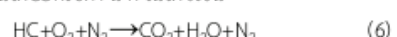
FP คือ กำลังงานเชื้อเพลิง (kW)

2.3 การเผาไหม้ของเครื่องยนต์

สามารถแบ่งออกได้ดังนี้ คือ

2.3.1 การเผาไหม้ที่สมบูรณ์

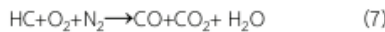
น้ำมันเชื้อเพลิง+อากาศ (ออกซิเจนและไนโตรเจน) \rightarrow คาร์บอนไดออกไซด์+น้ำ+ไนโตรเจน



2.3.2 การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

น้ำมันเชื้อเพลิง+อากาศ (ออกซิเจนและไนโตรเจน) →

คาร์บอนมอนอกไซด์+คาร์บอนไดออกไซด์+น้ำ



2.4 การประเมินระบบฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล

2.4.1 มุมสเปรย์ของการแตกเป็นละอองฝอย

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{1}{A} 4\pi \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\sqrt{3}}{6} \quad (8)$$

เมื่อ θ คือ มุมสเปรย์ของการแตกเป็นละอองฝอย(องศา)

ρ_g คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

A คือ ค่าคงตัวสำหรับหัวฉีดหนึ่งๆ มีค่าเท่ากับ

$$3.0+0.28 \left(\frac{L_n}{d_n} \right)$$

$\left(\frac{L_n}{d_n} \right)$ คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของหัวฉีด

2.4.2 การพุ่งของสเปรย์ (Spray Penetration)

ความเร็วและระยะที่พุ่งเข้าไปในห้องเผาไหม้ของสเปรย์ จะมีผลสำคัญต่อการใช้อากาศและอัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

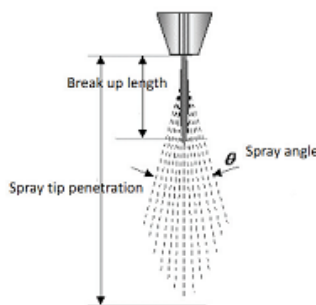
$$S = 3.07 \left(\frac{\Delta p}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{4}} t d_n \left(\frac{294}{T_g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

เมื่อ S คือระยะที่พุ่งเข้าไปในห้องเผาไหม้ของสเปรย์ละอองฝอยเชื้อเพลิง (m)

t คือ เวลาหลังการเริ่มต้นฉีด (s)

d_n คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูหัวฉีด (m)

T_g คือ อุณหภูมิของแก๊ส (K)



รูปที่ 1 ลักษณะละอองเชื้อเพลิงที่ฉีดจากหัวฉีด

3. อุปกรณ์และ วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า

ตารางที่ 1 รายละเอียดเครื่องยนต์

| เครื่องยนต์ | MERCEDES-BENZ รุ่น OM 421 |
|-------------------|---------------------------|
| แบบการทำงาน | ดีเซล 4-จังหวะ |
| จำนวนสูบ | 6 สูบ |
| ลำดับการจุดระเบิด | 1 4 2 5 3 6 |
| ขนาดกระบอกสูบ | 128 mm |
| ระยะชัก | 142 mm |
| อัตราส่วนการอัด | 16.9:1 |
| ความจุกระบอกสูบ | 10,964 ซีซี |
| เชื้อเพลิง | น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล |
| แรงบิดสูงสุด | 784 N-m ที่ 1200 rpm |
| กำลังงานสูงสุด | 159 Kw ที่ 2300 rpm |

ตารางที่ 2 รายละเอียดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

| เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | AEG รุ่น DKBH 4284/04 |
|--------------------|-----------------------|
| กำลังไฟฟ้า | 150 กิโลวัตต์แอมป์ |
| เพาเวอร์แฟคเตอร์ | 0.8 |
| ความต่างคักยไฟฟ้า | 440 โวลต์ |
| กระแสไฟฟ้า | 193 แอมป์ |
| ความถี่ | 60 เฮิร์ตซ์ |
| ความเร็วรอบ | 1800 rpm |
| จำนวนเฟส | 3 เฟส |

3.2 ระบบควบคุมและแสดงผลของเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า

ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงาน แสดงผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และแจ้งเตือนสัญญาณผิดปกติที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2



(ก) ระบบ MWK 15T



(ข) ระบบ DSG 822



(ค) Monitoring system

รูปที่ 2 ระบบควบคุมและแสดงผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.4 เครื่องมือทดสอบหัวฉีด

ใช้สำหรับทดสอบกำลังดัน และลักษณะการฉีดน้ำมัน
เชื้อเพลิงของหัวฉีด (Spray Pattern) ดังรูป 3



รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบหัวฉีด

3.5 อุปกรณ์วัดแก๊สไอเสีย

ใช้สำหรับวัดปริมาณไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้
ของเครื่องยนต์ ดังรูป 4



(ก) เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย CO และ HC



(ข) เครื่องวิเคราะห์ควันดำในไอเสีย

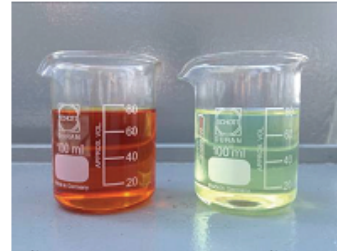


(ค) เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย O₂, CO, NO, NO₂, NO_x, SO₂,
CO₂, อุณหภูมิไอเสีย

รูปที่ 4 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย

3.6 น้ำมันเชื้อเพลิง

น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดลอง สำหรับน้ำมัน
ดีเซลสังเคราะห์จากบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ส่วน
น้ำมันไบโอดีเซล B100 ได้รับการสนับสนุนสำหรับการ
วิจัยจาก บริษัท ไทยโอดีเซล จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทที่
ได้รับการรับรองจากกรมธุรกิจพลังงาน ให้เป็นผู้ผลิตและ
จำหน่ายน้ำมันไบโอดีเซล B100 ที่ได้มาตรฐาน ดังรูปที่ 5



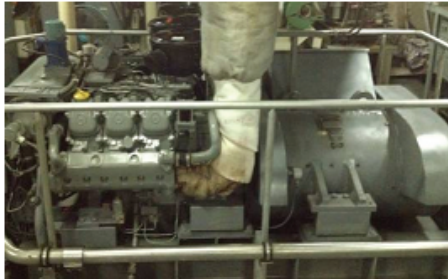
รูปที่ 5 น้ำมันไบโอดีเซล B100 (ซ้าย) น้ำมันดีเซล (ขวา)
ตารางที่ 3 การกำหนดรหัสเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

| อัตราส่วนของเชื้อเพลิง ร้อยละโดยปริมาตร | รหัส |
|---|------|
| ดีเซล | B0 |
| ดีเซลร้อยละ 95+ไบโอดีเซลB100 ร้อยละ 5 | B5 |
| ดีเซลร้อยละ 90+ไบโอดีเซลB100 ร้อยละ 10 | B10 |
| ดีเซลร้อยละ 85+ไบโอดีเซลB100 ร้อยละ 15 | B15 |
| ดีเซลร้อยละ 80+ไบโอดีเซลB100 ร้อยละ 20 | B20 |
| ดีเซลร้อยละ 75+ไบโอดีเซลB100 ร้อยละ 25 | B25 |
| ดีเซลร้อยละ 50+ไบโอดีเซลB100 ร้อยละ 50 | B50 |
| ดีเซลร้อยละ 25+ไบโอดีเซลB100 ร้อยละ 75 | B75 |
| ไบโอดีเซล B100 | B100 |



รูปที่ 6 ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัตราส่วนผสมต่างๆ
ขั้นตอนการทดลอง

ทำการผสมน้ำมันเชื้อเพลิงตามอัตราส่วนต่างๆ ตาม
ตารางที่ 3 ดังรูปที่ 6 และนำน้ำมันเชื้อเพลิงที่ทำการผสม
ไปวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิง ได้แก่
ความร้อนเชื้อเพลิง ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ
และลักษณะการสเปรย์ของฝอยละอองเชื้อเพลิง จากนั้น
นำน้ำมันแต่ละชนิด ไปทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ โดย
สภาวะการเดินเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลอง กำหนดให้
ภาระทางไฟฟ้าที่มีค่าคงที่เท่ากับ 36 กิโลวัตต์ (30% ของ
โหลดสูงสุด) ที่ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาทีซึ่ง
เป็นสภาวะคงที่ของรอบการทำงานของเครื่องยนต์ และ
ทำการบันทึกค่าต่างๆ เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น
เครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าบนเรือซึ่งถูกติดตั้ง ดังรูปที่ 7

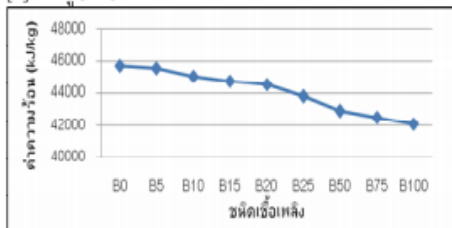


รูปที่ 7 เครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าเรือ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ผล เพื่อหาสมรรถนะต่างๆ ของเครื่องยนต์ ได้แก่ อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และวิเคราะห์หาลมพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน และควันดำ

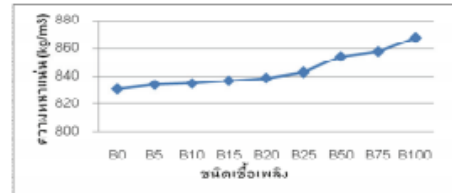
4.ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ผลจากการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงพบว่าเมื่ออัตราส่วนของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะลดลง โดยค่าความร้อนของเชื้อเพลิง B5 B10, B15, B20, B25, B50, B75 และ B100 มีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิง B0 เท่ากับ 0.45%, 1.56%, 2.22%, 2.67%, 4.22%, 6.21%, 7.09% และ 7.97% ตามลำดับ [1] ดังรูปที่ 8



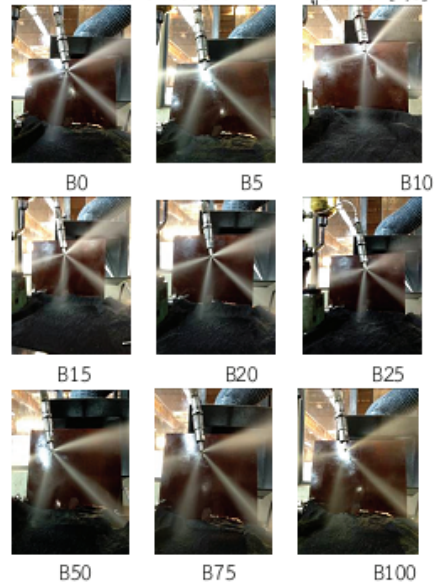
รูปที่ 8 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงพบว่าเมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยเชื้อเพลิง B0 มีความหนาแน่นน้อยที่สุดเท่ากับ 831 kg/m^3 ส่วนเชื้อเพลิง B100 มีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 868 kg/m^3 [1] ดังรูปที่ 9



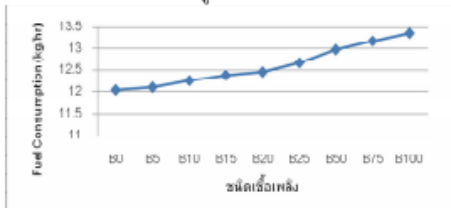
รูปที่ 9 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

ผลการทดสอบมุมสเปรย์และฝอยละอองของน้ำมันเชื้อเพลิง วิธีการทดสอบจะทำการทดสอบเชื้อเพลิงไบโอดีเซลอัตราส่วนผสมต่างๆ กับหัวฉีดที่ติดตั้งกับแท่นทดสอบหัวฉีด โดยทดสอบที่แรงดันหัวฉีด 175 บาร์ เป็นค่าแรงดันมาตรฐานของหัวฉีดเครื่องยนต์ (Bosch Germany) เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและความหนืดของเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแตกตัวเป็นละอองฝอยได้ง่าย และพบว่าลักษณะฝอยละอองของเชื้อเพลิงจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ระยะฉีดไกลสุด (Spray tip penetration) ไกลขึ้นและจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงช้าลง ส่วนค่ามุมสเปรย์ (Spray cone angle) มีขนาดลดลงทำให้ละอองเชื้อเพลิงเกิดการคลุกเคล้ากับอากาศไม่เต็มประสิทธิภาพ เป็นผลให้การสันดาปเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ไม่เต็มและเกิดการตกค้างของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ดังรูปที่ 10 [2,3]

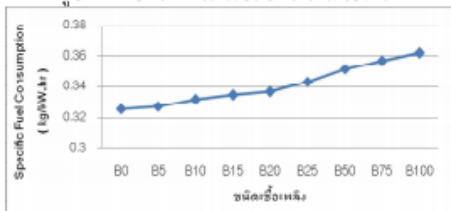


รูปที่ 10 ลักษณะมุมสเปรย์และฝอยละอองที่ออกจากหัวฉีดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลก้านิต ไฟฟ้า พบว่า เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Consumption) และอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะลดลงตามอัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความร้อนน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับภาระทางไฟฟ้าเดียวกัน โดยอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง B5, B10, B15, B20, B25, B50, B75, และ B100 มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิง B0 เท่ากับ 0.50%, 1.82%, 2.72%, 3.32%, 5.00%, 7.29%, 8.68% และ 9.98% ตามลำดับ ดังรูปที่ 11 ส่วนอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิง B5, B10, B15, B20, B25, B50, B75 และ B100 มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิง B0 เท่ากับ 0.78% 2.02 %, 3.07%, 4.20%, 5.79% ,8.13%, 9.72% และ 12.50% ตามลำดับ ดังรูปที่ 12



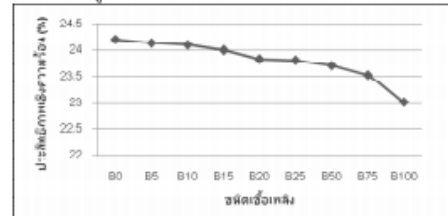
รูปที่ 11 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง



รูปที่ 12 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนพบว่าเมื่ออัตราส่วนของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลดลง เนื่องจากผลของเชื้อเพลิงที่ใหญ่ขึ้นใหญ่ ทำให้เกิดการสูญเสียที่มากกว่าปกติได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่มีค่าลดลง จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยเชื้อเพลิง B5, B10, B15, B20, B25, B50, B75 และ B100 ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าเชื้อเพลิง B0 เท่ากับ 0.31%, 0.45%, 0.84%,

1.57%, 1.65%, 2.07%, 2.89%, และ 5.14% ตามลำดับ [4,7] ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์

ผลการทดสอบมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น พบว่า

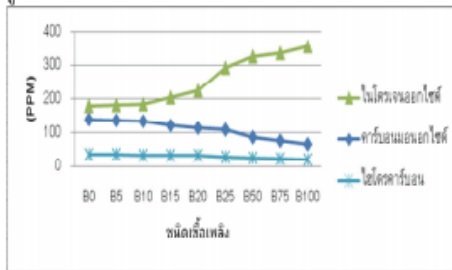
1.ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีปริมาณลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนออกซิเจนในโครงสร้างของน้ำมันไบโอดีเซลเข้าไปช่วยในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น การเผาไหม้ก็ยิ่งสมบูรณ์ขึ้น จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณลดลง โดยเชื้อเพลิง B0 มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สูงสุดเท่ากับ 140 ppm และ B100 มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ต่ำสุดเท่ากับ 66 ppm ดังรูปที่ 14

2.ก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC) มีปริมาณลดลง เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลมีส่วนประกอบไฮโดรคาร์บอนน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจึงมีปริมาณไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิงจึงลดลง เมื่อเกิดการเผาไหม้จึงปนออกมากับไอเสียลดลง โดยเชื้อเพลิง B0 มีปริมาณก๊าซไฮโดรคาร์บอนสูงสุดคือ 35 ppm และ เชื้อเพลิง B100 มีปริมาณก๊าซไฮโดรคาร์บอน ต่ำสุดคือ 22 ppm ดังรูปที่ 14

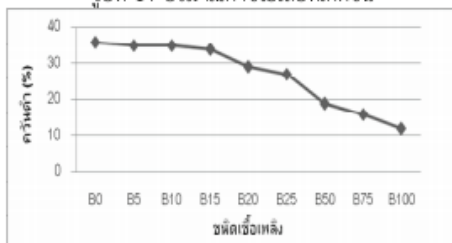
3.ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุแรกเกิดจากจำนวนออกซิเจนในโครงสร้างของน้ำมันไบโอดีเซลรวมตัวกับไนโตรเจน ทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น สาเหตุที่สองโดยปกติก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เกิดจากการสันดาปในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง และเนื่องจากความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลที่มากกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ผลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ออกจากหัวฉีดสูญเสียที่อากาศได้ไม่ดี และเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด (ignition delay) มากขึ้น ทำให้ช่วงนี้เกิดการสะสมของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ เมื่อเกิดการลุกไหม้จึงเผาไหม้อย่างรุนแรงและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูง

ทำให้การเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยเชื้อเพลิง B0 มีปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ต่ำสุดเท่ากับ 180 ppm และเชื้อเพลิง B100 มีปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ สูงสุดเท่ากับ 356 ppm ดังรูปที่ 14

4. คว้นดำมีปริมาณลดลง คว้นดำเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้คาร์บอนบางส่วนในน้ำมันเชื้อเพลิง (ไฮโดรคาร์บอน) ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงเหลือเขม่าดำออกมาทางไอเสีย ดังนั้นเมื่อเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิงลดลง ทำให้เมื่อเกิดการเผาไหม้จึงเกิดเขม่าดำน้อยกว่าน้ำมันดีเซล โดยเชื้อเพลิง B0 มีปริมาณเขม่า สูงสุดเท่ากับ 36 % และเชื้อเพลิง B100 มีปริมาณเขม่า ต่ำสุดเท่ากับ 12 % ดังรูปที่ 15



รูปที่ 14 ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น



รูปที่ 15 ปริมาณคว้นดำ

การทดสอบเพิ่มเติมหลังจากการเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิง B0 กับ B20 เป็นระยะเวลา 200 ชั่วโมง และ B100 เป็นระยะเวลา 50 ชั่วโมง เมื่อทำการถอดหัวฉีดมาตรวจสอบพบว่าหัวฉีดจะมีคราบเขม่าสีดำเกาะบริเวณรูของหัวฉีดเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 16 ซึ่งมีผลทำให้การฉีดน้ำมันเป็นละอองฝอยไม่ดี ทิศทางและขนาดของมุมสเปรย์เปลี่ยนไปจากเดิม (ก่อนการทดลอง) ทำให้ประสิทธิภาพในการฉีดเชื้อเพลิงของหัวฉีดลดลง การเผาไหม้ประสิทธิภาพลดลง



รูปที่ 16 สภาพหัวฉีดเมื่อใช้เชื้อเพลิงต่างๆ

5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าเรือ โดยใช้น้ำมันดีเซลผสมน้ำมันไบโอดีเซลอัตราส่วนต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ จะเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลดลง เนื่องจากค่าความร้อนของน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ในส่วนของมลพิษไอเสีย พบว่าเมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคว้นดำ จะมีปริมาณลดลงก็เนื่องมาจากส่วนประกอบภายในโครงสร้างของไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั่นเอง แต่ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) มีปริมาณเพิ่มขึ้น สาเหตุน่าจะเกิดจากผลระยะของของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ออกจากหัวฉีดมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ละอองเชื้อเพลิงเกิดการคลุกเคล้ากับอากาศได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการสะสมของเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ เมื่อเกิดการลุกไหม้จึงเผาไหม้อย่างรุนแรง จึงทำให้การเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นหากมีการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจะต้องปรับปรุงเครื่องยนต์ เช่น หัวฉีดเชื้อเพลิง ลักษณะห้องเผาไหม้ให้เหมาะสม เพื่อให้เครื่องยนต์มีการสันดาปที่สมบูรณ์ จากการทดลองตามเงื่อนไขข้างต้นพอสรุปได้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้งานทดแทนน้ำมันดีเซลได้ตามความเหมาะสมของลักษณะการใช้งาน แต่เงื่อนไขที่ดีที่สุดและผลกระทบต่อเครื่องยนต์ในระยะยาวยังไม่สามารถสรุปผลได้ เนื่องจากต้องใช้เวลานานในการทดสอบและการวิเคราะห์มีความซับซ้อนมาก เนื่องมาจากการใช้งานจริงมักมีตัวแปรต่างๆที่ไม่สามารถควบคุมได้เข้ามาเกี่ยวข้อง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท ไทโอลิโอเคมี จำกัด ที่สนับสนุนน้ำมันไบโอดีเซล B100 สำหรับงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่อุทหากรเรือพระจุลจอมเกล้า และเจ้าหน้าที่แผนกช่างกลเรือหลวงหนองสาหร่าย ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย จนการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] เกรียงศักดิ์ ดวงใจ, “การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างน้ำมันดีเซลผสมน้ำมันปาล์มและน้ำมันดีเซลผสมสารเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า,” สารนิพนธ์ วท.ม. (การจัดการอุตสาหกรรม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2551.
- [2] แสนวลันต์ ยอดคำ, “สมรรถนะและการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลผลิตระแสไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบแบบดีกัมส์ผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิง,” วิทยานิพนธ์ วท.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2552.
- [3] นคร ทิพย์วงศ์, ศุภรินทร์ ไชยกลางเมือง และอนุศาล เพิ่มสุวรรณ, “การประเมินการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่ใช้งานยาวนานโดยใช้น้ำมันปาล์มดีเซลเป็นเชื้อเพลิง,” วิทยานิพนธ์วท.ม(วิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2546.
- [4] ตติยา คำทิพย์, “การทดลองศึกษาผลการใช้ไขมันมะเคาะผสมดีเซลและไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเคาะเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล,” ในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, จังหวัดเชียงใหม่, 2555
- [5] ประเสริฐ เทียนนิมิต, ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และปานเพชร ชินนิต, “เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น,” หน้าที่ 178-202, กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2554.
- [6] M.A. Kalam and H.H. Masjuki, “Biodiesel from palmoil – an analysis of properties and potential,” Biomass and Bioenergy ,2002.
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, “ผลทดสอบการใช้ไบโอดีเซล,” [บทความออนไลน์] สืบค้นจาก <http://www.dede.go.th>, 10 สิงหาคม 2555.
- [8] ปัญญา ธนะปิยะวิชย์ และพงษ์ศักดิ์ แสนสะอาด, “การทดสอบระยะยาวในการใช้เมธิลเอสเทอร์จากน้ำมันใส่อยู่กับเครื่องยนต์เกษตรกรรมขนาดเล็ก,” วิทยานิพนธ์ วท.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2545.