

คุณลักษณะแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันผสมไดเอทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิง

Emission characteristics of a diesel engine fuelled with diethyl ether blends

เอกรงค์ สุขจิต^{1*}, สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์², ปริญา มาสงามเมือง¹, ศรัทธา โพธิสว่าง³, จ่านงค์ ผายสระน้อย³,
เพชร วุฒิमानพ¹ และ กนต์ธร ธรรมกุล¹

1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: ekarong@sut.ac.th โทรศัพท์: 044 224770 โทรสาร 044 224613

บทคัดย่อ

เพื่อเพิ่มศักยภาพสำหรับการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซล เอทานอลอาจถูกใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบเคมีอื่นเช่น ไดเอทิลอีเทอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติของการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ดีกว่าเอทานอล เช่น ตัวเลขซีเทนและค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอผลกระทบของน้ำมันผสมระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และน้ำมันดีเซลที่มีต่อคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงและมลพิษที่ได้จากการเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่า 25% ไดเอทิลอีเทอร์ในน้ำมันดีเซลทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันผสมมีค่าต่ำกว่าค่าความหนืดมาตรฐานของน้ำมันดีเซล (2-4.5 cSt) สำหรับการทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่า คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้ และออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงในทุกเงื่อนไขของการทดสอบ สำหรับการผสม 5% โดยปริมาตรของไดเอทิลอีเทอร์กับน้ำมันดีเซล เมื่อเปรียบเทียบผลมลพิษที่ได้กับผลของน้ำมันดีเซล ปริมาณ DEE ที่สูงขึ้นในน้ำมันดีเซลมีแนวโน้มทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้มีค่าสูงขึ้น

คำหลัก: เอทานอล, ไดเอทิลอีเทอร์, น้ำมันดีเซล, เครื่องยนต์ดีเซล, น้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก

Abstract

To enhance the use of ethanol in diesel engine, ethanol may be used as reactants to form other chemical compounds such as diethyl ether (DEE) which is more suitable to use as fuel in diesel engine (higher cetane number and calorific value compared to ethanol). In this study, the effect of DEE blended with diesel fuel on fuel blend properties and engine-out emissions was investigated. The fuel properties results show that the viscosity of 25% DEE blended with diesel fuel is over the limit of diesel fuel viscosity standard (2-4.5 cSt). The engine tests report that there is lower CO, HC and NOx emissions in any engine operating conditions tested for addition 5% DEE by volume, compared to diesel fuel. The higher percentage of DEE in fuel blends tends to increase CO and HC emissions.

Keywords: Ethanol, Diethyl Ether, Diesel Engine, Alternative Fuels

AEC-32

1. บทนำ

ในปัจจุบันในทุกภาคส่วนได้ให้ความสำคัญตระหนักเกี่ยวกับความคุ้มค่าในการใช้พลังงาน ไม่เว้นแต่ในภาคขนส่งที่ยานพาหนะส่วนใหญ่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงหลัก แหล่งน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นเพื่อลดปัญหาการขาดแคลนของน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิล การมองหาแหล่งน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกจึงเป็นสิ่งจำเป็น แหล่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับยานพาหนะที่ใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นต้นกำลังเป็นหัวข้องานวิจัยหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ยกตัวอย่างเช่น การผลิตไบโอดีเซลจากพืชที่สามารถบริโภคได้และบริโภคไม่ได้ การประยุกต์ใช้แก๊ซธรรมชาติเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล การประยุกต์ใช้สารประกอบแอลกอฮอล์ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน [1-13] เป็นต้น การเล็งเห็นถึงประโยชน์ของพืชที่ไม่สามารถบริโภคได้หรือวัสดุเหลือใช้ในการนำมาผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกให้กับยานพาหนะจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศในกลุ่มนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภท น้ำมันเบนซินและดีเซล

ประเทศไทยนั้นมีแหล่งวัตถุดิบหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นเอทานอลได้ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเอทานอลสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกโดยใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินและดีเซล ซึ่งถูกเรียกว่าน้ำมันแก๊สโซฮอล์และดีโซฮอล์ตามลำดับ เพื่อประโยชน์ในการลดการใช้ น้ำมันฟอสซิลในเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล แต่สำหรับการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลนั้นยังพบข้อเสียในด้านคุณสมบัติของน้ำมันผสมเอทานอลและดีเซลอยู่ด้วยกันหลายด้าน เช่นการลดลงของเลขซีเทน (Cetane number) ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (Heating value) เป็นต้น การเพิ่มศักยภาพของเอทานอลให้มีคุณสมบัติการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลจึงเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของเอทานอลเพื่อประโยชน์ในด้านการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล วิธีการหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มศักยภาพของการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลคือการใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารประกอบเคมีไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether, DEE) ผ่านกระบวนการ Dehydration ไดเอทิลอีเทอร์เป็นสารประกอบเคมีที่มีเลขซี

เทนและค่าความร้อนที่สูงกว่าเอทานอล ซึ่งเลขซีเทนที่สูงกว่าจะส่งผลให้การลดการหน่วงการจุดระเบิด และค่าความร้อนที่สูงจะเป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ นอกจากนั้นแล้วสารประกอบอีเทอร์นั้นยังมีผลดีต่อการลดปริมาณอนุภาคคาร์บอน (Particulate matters, PM) ที่ได้จากการเผาไหม้

ด้วยข้อดีในด้านคุณสมบัติการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงของไดเอทิลอีเทอร์เมื่อเปรียบเทียบกับเอทานอล บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ไดเอทิลอีเทอร์สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ใช้ในภาคเกษตรกรรม โดยไดเอทิลอีเทอร์ถูกนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันผสมและมลพิษที่ได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันผสม

2. วิธีดำเนินการ

2.1 น้ำมันเชื้อเพลิง

คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและไดเอทิลอีเทอร์แสดงดังตารางที่ 1 ข้อมูล Cetane number, และ Latent heat of vaporization ของน้ำมันดีเซลและไดเอทิลอีเทอร์ และ Flash point ของไดเอทิลอีเทอร์นำมาจากบทความวิจัยของ D.C. Rakopoulos และคณะ [14] ไดเอทิลอีเทอร์ถูกนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลโดยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของไดเอทิลอีเทอร์ในน้ำมันผสมที่ละ 5% จนถึง 25% โดยปริมาตร คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันผสมคือ ความหนาแน่น ความหนืด ดัชนีซีเทน และจุดวาบไฟถูกตรวจสอบตามมาตรฐาน ASTM

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและไดเอทิลอีเทอร์

Properties	Diesel	DEE
Density @15 °C (kg/m ³)	830	715
Viscosity (cSt)	3.8 (@40 °C)	0.24 (@20 °C)
Cetane number	50	125
Lower heating value (MJ/kg)	43.3	33.9
Flash point (°C)	72	-40
Latent heat of vaporization (kJ/kg)	250	355
Oxygen content (%)	0	21.6

AEC-32

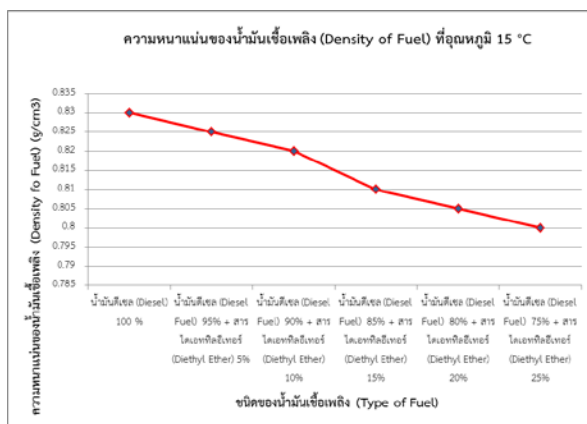
2.2 การทดสอบกับเครื่องยนต์

ในการทดสอบนี้ ได้ทำการทดสอบโดยการใส่เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว 4 จังหวะ มีความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงสุดอยู่ 3600 rpm และแรงม้าสูงสุดอยู่ที่ 4.2 hp ต่อเข้ากับไดนาโมมิเตอร์แบบใช้แรงดันน้ำในการสร้างโหลดเพื่อเบรกเครื่องยนต์ ทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ 2000 rpm ที่สภาวะเครื่องยন্ত্রรับโหลด 60%, 80% และ Full load ใช้เครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Testo 350 ในการประเมินแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้

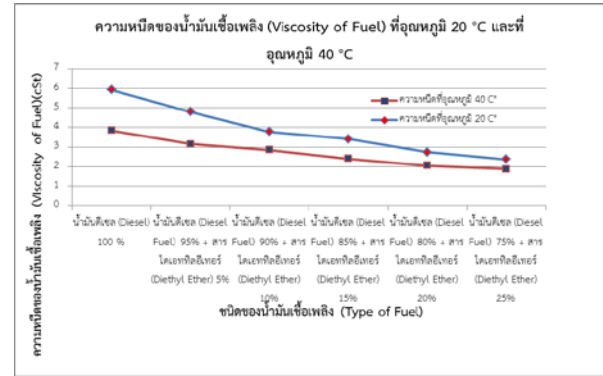
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 คุณสมบัติของน้ำมันผสม

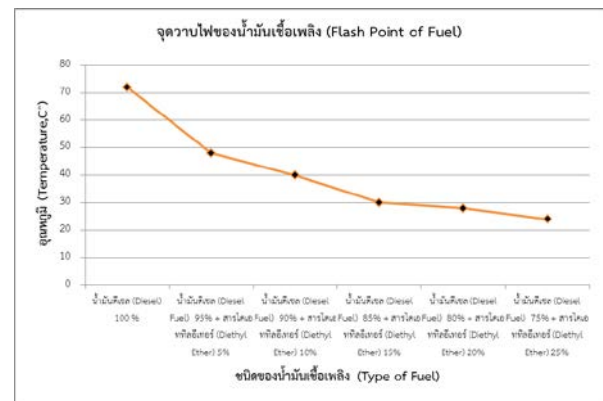
ความหนาแน่นของน้ำมันผสมดีเซลและไดเอทิลอีเทอร์แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า 10% DEE ในน้ำมันผสม มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าค่าความหนาแน่นมาตรฐานของน้ำมันดีเซล (0.82-0.86 g/cm³) ความหนืดของน้ำมันผสมที่อุณหภูมิ 20 °C และ 40 °C แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าความหนืดของน้ำมันผสมจะต่ำกว่าความหนืดมาตรฐานของน้ำมันดีเซล (2-4.5 cSt) เมื่อ 20% DEE ถูกนำไปผสมกับน้ำมันดีเซล รูปที่ 3 และ 4 แสดงจุดวาบไฟและดัชนีซีเทนของน้ำมันผสม พบว่าจุดวาบไฟลดลง 40% และดัชนีซีเทนเพิ่มจาก 54 เป็น 60 เมื่อ 10% DEE ถูกผสมกับน้ำมันดีเซล



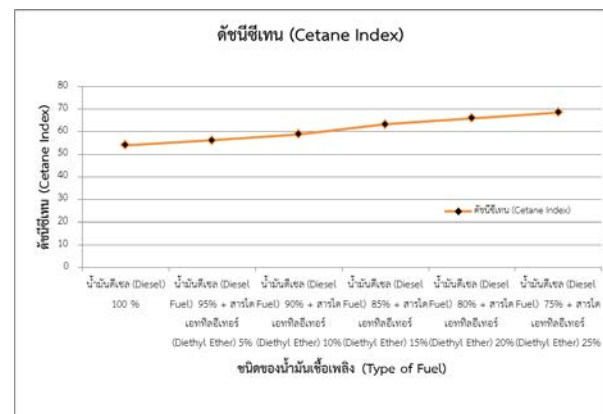
รูปที่ 1 ความหนาแน่นของน้ำมันผสม



รูปที่ 2 ความหนืดของน้ำมันผสม



รูปที่ 3 จุดวาบไฟของน้ำมันผสม



รูปที่ 4 ดัชนีซีเทนของน้ำมันผสม

3.2 แก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้

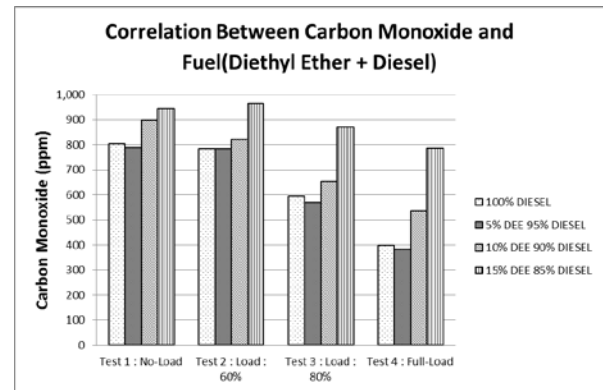
จากผลการทดลองในส่วนของคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เพื่อให้ น้ำมันผสมมีคุณสมบัติของน้ำมันอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานของน้ำมันดีเซล (พิจารณาจากความหนาแน่นและความหนืด) สำหรับหลีกเลี่ยงการปรับแต่งเครื่องยนต์ในการใช้ DEE เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล จึงได้ทำการทดสอบน้ำมันผสมที่ประกอบด้วย 5% 10% และ 15% DEE กับเครื่องยนต์ดีเซล ผลในด้านอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

AEC-32

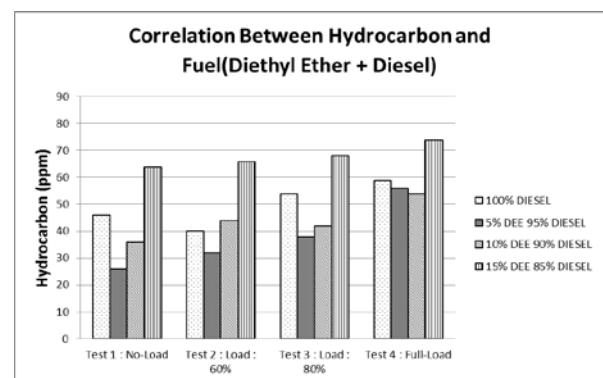
เชื้อเพลิงพบว่าน้ำมันผสมมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสูงกว่าน้ำมันดีเซล ซึ่งเป็นเหตุจากค่าความร้อนที่ต่ำของ DEE เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล แต่ทั้งนี้ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์อย่างมีนัยสำคัญ (ผลในส่วนนี้ไม่ได้นำเสนอในบทความ) แก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้ (HC) และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) แสดงในรูปที่ 5-7

คาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จากการทดลองพบว่าที่สภาวะของโหลดเพิ่มขึ้น ปริมาณของ CO มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มโหลดของเครื่องยนต์จะทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้นั้นดีขึ้น ปริมาณ 5% DEE ในน้ำมันผสมทำให้ปริมาณ CO ที่ได้มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากน้ำมันดีเซล ซึ่งเป็นผลจากอัตราส่วน C/H ของ DEE มีค่าน้อยกว่า และการที่ DEE มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ การเพิ่มสัดส่วนของ DEE ในน้ำมันผสมมีแนวโน้มทำให้ CO เพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุน่าจะเกิดจาก Latent heat of vaporization ของ DEE ที่มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับความร้อนจากการเผาไหม้ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง [15] ปัจจุบันจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของ CO มากกว่าการลดลงของ CO อันเนื่องมาจากอัตราส่วน C/H และปริมาณออกซิเจนในน้ำมันผสม

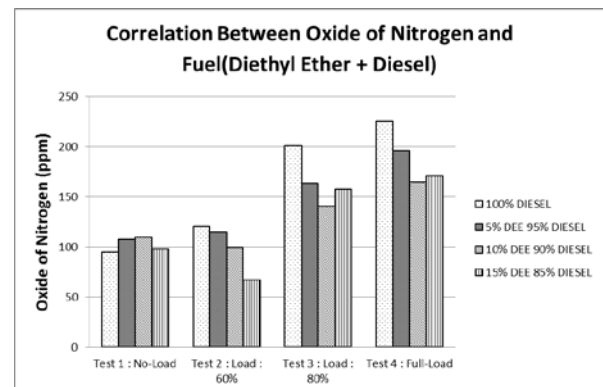
ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ DEE ในน้ำมันผสม สาเหตุน่าจะมาจากค่า Latent heat of vaporization ที่สูงของ DEE ทำให้การระเหยของน้ำมันผสมเป็นไปได้ช้าลงและเกิดอัตราส่วนของอากาศและน้ำมันที่ไม่เหมาะสมต่อการเผาไหม้ อีกทั้ง Latent heat of vaporization ของ DEE ก่อให้เกิดการดูดซับความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลงส่งผลเสียประสิทธิภาพการเผาไหม้ [14-16] ซึ่งผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณ DEE ในน้ำมันผสมจะส่งผลต่อการลดลงของออกไซด์ของไนโตรเจนดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 5 คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)



รูปที่ 6 ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้ (HC)



รูปที่ 7 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx)

4. สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้ไดเอทิลอีเทอร์ซึ่งเป็นสารประกอบเคมีที่สามารถผลิตได้จากเอทานอล ในเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับใช้ในภาคเกษตรกรรม ได้ถูกนำเสนอในบทความนี้ ผลการทดลองพบว่า 10% DEE ในน้ำมันผสมระหว่างดีเซลและไดเอทิลอีเทอร์ทำให้ค่าความหนาแน่นของน้ำมันผสมต่ำกว่าค่าความหนาแน่นมาตรฐานของน้ำมันดีเซลและทำให้

AEC-32

จุดวาบไฟของน้ำมันผสมลดลง 40% เมื่อเทียบกับจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซล การทดลองกับเครื่องยนต์ดีเซลพบว่า การเพิ่มปริมาณไดเอทิลอีเทอร์ ในน้ำมันผสมมีแนวโน้ม ทำให้ ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ และ คาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเหตุผลน่าจะเกิดจากค่า Latent heat of vaporization ที่ค่อนข้างสูงของไดเอทิลอีเทอร์ แม้ว่าอัตราส่วน C/H ของไดเอทิลอีเทอร์ จะต่ำกว่า เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลซึ่งส่งผลต่อการลดลงของ ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้และคาร์บอนมอนอกไซด์ ในทางกลับกันค่า Latent of heat vaporization ที่สูงของ ไดเอทิลอีเทอร์มีผลต่อการลดลงของออกไซด์ของ ไนโตรเจน ด้วยเหตุผลจากอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำลง เนื่องจากการดูดซับความร้อนของไดเอทิลอีเทอร์เพื่อทำให้เกิดการระเหยจะช่วยลดกระบวนการทางเคมีที่ ก่อให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจน จากผลการทดลองกับ เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวในงานวิจัยนี้ พอที่จะสรุปได้ว่า สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้ไดเอทิลอีเทอร์ผสมกับ น้ำมันดีเซลเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลควรมีค่าอยู่ระหว่าง 5-10% โดยปริมาตร โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ แต่หากมีความต้องการใช้ไดเอทิลอีเทอร์ในปริมาณที่สูงขึ้น เพื่อผสมกับน้ำมันดีเซลอาจจำเป็นต้องใช้สารเติมแต่งเพื่อ ปรับปรุงคุณสมบัติบางตัวของน้ำมันผสม หรือการใช้ น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติค่อนข้างตรงกันข้ามกับไดเอทิลอีเทอร์สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นน้ำมัน เชื้อเพลิงของน้ำมันผสมดีเซลและไดเอทิลอีเทอร์ กลายเป็นน้ำมันผสมดีเซล ไดเอทิลอีเทอร์ และไบโอดีเซล ซึ่งอาจเป็นคำตอบของการประยุกต์ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซล สำหรับประเทศไทยซึ่งไม่สามารถผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลได้เอง

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. อรรถพล มณีแดง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนสารไดเอทิลอีเทอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณศรัณย์ ดอกไม้กุล เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี อาคารเครื่องมือ 6 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการอบรมการใช้ เครื่องมือเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของน้ำมันเชื้อเพลิง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [2] Lapuerta M, Armas O, García-Contreras R. Effect of ethanol on blending stability and diesel engine emissions. *Energy Fuel*. 2009;23(9):4343-54.
- [3] Lapuerta M, García-Contreras R, Campos-Fernández J, Dorado MP. Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol-diesel blends. *Energy Fuel*. 2010;24(8):4497-502.
- [4] Valentino G, Corcione FE, Iannuzzi SE, Serra S. Experimental study on performance and emissions of a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blends under premixed low temperature combustion. *Fuel*. 2012;92(1):295-307.
- [5] Lebedevas S, Lebedeva G, Sendzikiene E, Makareviciene V. Investigation of the performance and emission characteristics of biodiesel fuel containing butanol under the conditions of diesel engine operation. *Energy Fuel*. 2010;24(8):4503-9.
- [6] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Giakoumis EG, Dimaratos AM, Kyritsis DC. Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Convers Manage*. 2010;51:1989-97.
- [7] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Papagiannakis RG, Kyritsis DC. Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine. *Fuel*. 2011;90(5):1855-67.
- [8] Sukjit E, Herreros JM, Dearn KD, García-Contreras R, Tsolakis A. The effect of the addition of individual methyl esters on the combustion and emissions of ethanol and butanol -diesel blends. *Energy*. 2012;42(1):364-74.
- [9] Sukjit E, Dearn KD. Enhancing the lubricity of an environmentally friendly Swedish diesel fuel MK1. *Wear*. 2011;271(9-10):1772-7.
- [10] Ishida M, Yamamoto S, Ueki H, Sakaguchi D. Remarkable improvement of NOx-PM trade-off in a

AEC-32

diesel engine by means of bioethanol and EGR.
Energy. 2010;35(12):4572-81.

[11] Shi X, Yu Y, He H, Shuai S, Wang J, Li R. Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine. Fuel. 2005;84(12-13):1543-9.

[12] Lapuerta M, Armas O, Herreros JM. Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine. Fuel. 2008;87(1):25-31.

[13] Ren Y, Huang Z, Miao H, Di Y, Jiang D, Zeng K, et al. Combustion and emissions of a DI diesel engine fuelled with diesel-oxygenate blends. Fuel. 2008;87(12):2691-7.

[14] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Giakoumis EG, Dimaratos AM. Characteristics of performance and emissions in high-speed direct injection diesel engine fueled with diethyl ether/diesel fuel blends. Energy. 2014;43:214-224.

[15] Sivalakshmi S, Balusamy T. Effect of biodiesel and its blends with diethyl ether on the combustion, performance and emissions from a diesel engine. Fuel. 2013;106:106-110.

[16] Qi DH, Chen H, Geng LM, Bian YZ. Effect of diethyl ether and ethanol additives on the combustion and emissions characteristics of biodiesel-diesel blended fuel engine. Renewable Energy. 2011;36:1252-1258