



คุณลักษณะการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงที่ผลิตจาก
น้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมกับดีเซล

**Fluidity Characteristics of Fuel Produced from
Mixed Crude Palm Oil Blended with Diesel**

ปริญญา หม่อมพิบูลย์

Parinya Mompiboon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ คุณลักษณะการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ
 หีบรวมผสมกับดีเซล
 ผู้เขียน นายปริญญา หม่อมพิบูลย์
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการที่ปรึกษา

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร)

.....ประธานกรรมการ
 (ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมเครื่องกล

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ หีบรวมผสมกับดีเซล
ผู้เขียน	นายปริญญา หม่อมพิบูลย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบ กระบวนการผลิต ต้นทุน และองค์ประกอบ ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ และเมทิลเอสเตอร์ และศึกษาคุณลักษณะการเป็นของเหลวที่สำคัญ 3 ประเภท ได้แก่ ความหนืด จลศาสตร์ ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิงดังกล่าวเมื่อผสมในดีเซลที่สัดส่วน 0-100 vol.% จากผลการศึกษาข้างต้น เชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจ เหมาะสมสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ การเกษตร ถูกเลือกทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง และสมรรถนะเครื่องยนต์ระยะสั้นเปรียบเทียบดีเซล

ผลการศึกษา พบว่า เชื้อเพลิงทั้งหมด ผลิตง่าย มีต้นทุน 22.77 43.01 28.55 และ 35.68 บาท/ลิตร ตามลำดับ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นคือ ปริมาณการได้กินด้า และปริมาณสารเคมีที่ใช้ โดยเฉพาะเมทานอล ต้นทุนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ แข่งขันกับดีเซลได้ นอกจากนี้ การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวมีจุดเด่นคือ ใช้สารเคมีน้อยมาก เชื้อเพลิง 4 ชนิด ประกอบขึ้นด้วยชนิดกรดไขมันที่เหมือนกัน จึงมีสูตรโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันเหมือนกัน คือ $C_{16.93}H_{32.66}O_2$ แต่มีปริมาณองค์ประกอบ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และเมทิลเอสเตอร์ ที่ต่างกัน จึงมีสูตรโมเลกุลเฉลี่ยต่างกันเป็น $C_{47.72}H_{88.92}O_{5.42}$ $C_{50.98}H_{94.87}O_{5.79}$ $C_{43.31}H_{80.90}O_{4.93}$ และ $C_{17.99}H_{34.77}O_{2.02}$ ตามลำดับ มีความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40°C เป็น 37.8 41.1 23.9 และ 5.05 cSt มีความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15.6°C เป็น 931 932 915 และ 884 kg/m³ และมีสัดส่วนการเป็นไขที่ 85 95 32 และ 0 vol.% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณา ต้นทุนการผลิต ความหนืดจลศาสตร์ ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข สรุปได้ว่า เชื้อเพลิงผสม 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล 20 vol.% (ลดยางเหนียว 20) และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ผสมในดีเซล 30 vol.% (เอสเตอรีไฟน์ 30) เป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจเหมาะสำหรับใช้ในเครื่องยนต์การเกษตร โดยมีสูตรโมเลกุล

เฉลี่ยเป็น $C_{20.02}H_{36.70}O_{1.18}$ และ $C_{22.20}H_{40.91}O_{1.57}$ ตามลำดับ (เทียบกับดีเซล $C_{12.30}H_{22.14}$) เชื้อเพลิงผสมทั้งสองมีคุณสมบัติโดยรวมใกล้เคียงดีเซล แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงผสมมีส่วนผสมของอะตอมของออกซิเจนอยู่ด้วย จึงมีค่าซีเทนสูงกว่าดีเซล และมีค่าความร้อนต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อย (3.49-3.65%) เครื่องยนต์ที่เดินด้วยเชื้อเพลิงผสมสามารถเดินได้ปกติเช่นเดียวกับดีเซล เมื่อเปรียบเทียบกับดีเซล เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดขางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 มีแรงบิดมากกว่า 3.57 และ 4.36% มีกำลังเบรคมากกว่า 3.43 และ 4.21% มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะมากกว่า 2.29 และ 3.11% มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคมากกว่า 1.31 และ 0.66% มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า 20.75 และ 17.74% และมีการปลดปล่อยก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนมากกว่า 6.35 และ 11.21% ตามลำดับ

Thesis Title	Fluidity Characteristics of Fuel Produced from Mixed Crude Palm Oil Blended with Diesel
Author	Mr.Parinya Mompiboon
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2011

ABSTRACT

This research had comparatively studied of production procedure, cost, and composition of 4 fuels produced from mixed crude palm oil (MCPO) including degummed MCPO, degummed and deacidified MCPO, esterified MCPO and methyl esters; and had characterized 3 important fluidity characteristics including kinematics viscosity, density, and un-wax of these fuels as blending with diesel at portions of 0-100 vol.% Based on above results, the interesting blends for using in an agricultural engine were selected, tested their fuel properties, and short term operated the engine to study engine's performances as compared with diesel.

The results found that all fuels can be easily produced and their production costs are 22.77, 43.01, 28.55 and 35.68 Baht/liter, respectively. Important parameters increasing the production cost are low production yield and required chemical reactants especially methanol. Production costs of degummed MCPO and esterified MCPO are competitive with diesel price. Moreover, producing degummed MCPO has an additional feature that requires less chemical reactant. For 4 fuels: they consist of the same fatty acid compositions; therefore, they also have the same average molecular formula of fatty acids ($C_{16.93}H_{32.66}O_2$); but, they consist of different amounts of triglycerides, diglycerides, monoglycerides, free fatty acids, and methyl esters; thus, they have the different molecular formulas as $C_{47.72}H_{88.92}O_{5.42}$, $C_{50.98}H_{94.87}O_{5.79}$, $C_{43.31}H_{80.90}O_{4.93}$ and $C_{17.99}H_{34.77}O_{2.02}$, respectively; their kinematics viscosity at 40°C are 37.8, 41.1, 23.9 and 5.05 cSt; their density at 15.6°C are 931, 932, 915 and 884 kg/m³; and their wax portions are 85, 95, 32 and 0 vol.%, respectively.

Based on production cost, kinematics viscosity, density, and un-wax; it could be concluded that the blend of degummed MCPO at the portion of 20 vol.% in diesel (DgMCPO) and the blend of esterified MCPO at the portion of 30 vol.% in diesel (EMCPO) are the

interesting blends for using in an agricultural engine. Their molecular formulas are $C_{20.02}H_{36.70}O_{1.18}$ and $C_{22.20}H_{40.91}O_{1.57}$, respectively, as compared with diesel ($C_{12.30}H_{22.14}$). Both blends have the overall fuel properties similar to diesel. But, due to the blends also consist of oxygen atoms; their cetane numbers are higher than diesel and their heating values are lower (3.49-3.65%). The engine fuelled with the blends can be normally operated similar to diesel. As compared to diesel, the engine operated with DgMCPO20 and EMCPO30 have higher torques of 3.57 and 4.36%, higher brake powers of 3.43 and 4.21%, higher brake specific fuel consumption of 2.29 and 3.11%, higher brake thermal efficiencies of 1.31 and 0.66%, lower carbon monoxide emissions of 20.75 and 17.74% and higher oxides of nitrogen emissions of 6.35 and 11.28%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ กำพล ประทีปชัยกูร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤษฎิรา รัตนวิไล กรรมการผู้แทน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์ กรรมการผู้แทนบัณฑิต
วิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ในการทำวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณจีระศักดิ์ เพียรเจริญ คุณทวีศักดิ์ ชัดดียวรรณ คุณนเรศ จินดาเพ็ชร
คุณสุภชัย ดั้นกะชาติ คุณสุรชัย จันทร์ศรี และครูปฏิบัติกร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกๆ ท่าน
ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณ คุณกฤตพจน์ เทพษร คุณชยานันท์ ชังชาดา คุณนรัฐ สีนอุดม
คุณบรมศักดิ์ วิทยาประภากร คุณวศิณา ปรีชาตินนท์ และ คุณสุจิตรา แสงศรี ที่ช่วยเก็บข้อมูล

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนผู้ช่วยสอน

นอกจากนี้ ผู้เขียนขออุทิศวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับ บิดาของผู้เขียน คือ
คุณพ่อชูศักดิ์ หม่อมพิบูลย์ และมารดาของผู้เขียน คือ คุณแม่เมทินี หม่อมพิบูลย์ ผู้เขียนขอขอบคุณ
กำลังใจจากครอบครัว พี่ชายของผู้เขียน คุณภาณุวัฒน์ หม่อมพิบูลย์ และ คุณรัฐพล หม่อมพิบูลย์
และเครือญาติทุกคนที่ไม่ได้กล่าวถึง และขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อนๆ ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้

ปริญญา หม่อมพิบูลย์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(18)
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 การตรวจเอกสาร	5
2.1 ต้นทุนดีเซลและน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	5
2.2 การผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล	10
2.3 องค์ประกอบเชื้อเพลิง	16
2.4 คุณสมบัติค่าซีเทน	17
2.4 คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ	18
2.5 การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์	22
3 วิธีการวิจัย	27
3.1 การผลิตและต้นทุน ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	27
3.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิง	30
3.2.1 องค์ประกอบ	30
3.2.2 ชนิดกรดไขมัน	31
3.3 คุณสมบัติการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงผสม	31
3.3.1 ความหนืดจลศาสตร์	31
3.3.2 ความหนาแน่น	31
3.3.3 คุณลักษณะการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสม	32
3.3.4 การสร้างสมการคณิตศาสตร์ทำนายความหนืดจลศาสตร์และความหนาแน่น และการตรวจสอบความแม่นยำของสมการ	32
3.3.5 การสร้างสมการคณิตศาสตร์ทำนายการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสม	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การเลือกเชื้อเพลิงทดสอบ	34
3.5 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง สมรรถนะเครื่องยนต์ และการปลดปล่อยไอเสีย	34
3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง	34
3.5.2 การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ และการปลดปล่อยไอเสีย	34
4 ผลและวิจารณ์	37
4.1 การผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและต้นทุน	37
4.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิง	40
4.2.1 องค์ประกอบ	40
4.2.2 ชนิดกรดไขมัน	45
4.2.3 สูตรโมเลกุล	45
4.3 ความหนืดจลศาสตร์	49
4.3.1 ผลการทดลองและวิจารณ์	49
4.3.2 ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	51
4.3.3 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์	52
4.4 ความหนาแน่น	68
4.4.1 ผลการทดลองและวิจารณ์	68
4.4.2 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	70
4.4.3 สมการทำนายความหนาแน่น	74
4.5 การไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล	91
4.5.1 ผลการทดลองปริมาณไขของเชื้อเพลิงผสม	91
4.5.2 การไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล	95
4.6 การเลือกเชื้อเพลิงผสม	103
4.6.1 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง	107
4.6.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ	108
4.7 การทดสอบสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์การเกษตร	111
4.7.1 การเดินเครื่องยนต์ทั่วไป	111
4.7.2 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	111

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7.3 สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย	111
4.7.4 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย	114
4.7.5 อุณหภูมิก๊าซไอเสีย	116
4.7.6 แรงบิดและกำลังเบรค	118
4.7.7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ	118
4.7.8 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค	122
4.7.9 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสีย	124
4.7.10 ปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสีย	125
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	128
5.1 สรุปผล	128
5.1.1 การผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและต้นทุน	128
5.1.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิง	128
5.1.3 ความหนืดจลศาสตร์	128
5.1.4 ความหนาแน่น	129
5.1.5 การไม่เป็นใจของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล	129
5.1.6 การทดสอบสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์การเกษตร จากการเลือกเชื้อเพลิงผสม	130
5.2 ข้อเสนอแนะ	131
บรรณานุกรม	136
ภาคผนวก	143
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ	144
ภาคผนวก ข การคำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล	145
ภาคผนวก ค ต้นทุนสารเคมี	147
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมัน	148
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ค่าซีเทน	149
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟ	150
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์ค่ากักถ่าน	151

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์เจ้าชัลเฟต	152
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	153
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์	154
ประวัติผู้เขียน	162

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 มาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย	2
2.1 ราคาดีเซล และผลผลิตจากปาล์มน้ำมันเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 ถึง พ.ศ. 2552	10
2.2 ชนิดกรดไขมันของน้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันปาล์ม โอเลอิน ไบปาล์ม สเตียร์น และส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (wt.%)	17
2.3 ระบบหน่วยความหนืด	19
3.1 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	30
4.1 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	39
4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (wt.%)	41
4.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมกับดีเซล (wt.%)	42
4.4 สูตรโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในโมเลกุลต่างๆ ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	46
4.5 สูตรโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	47
4.6 สูตรโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในเชื้อเพลิงผสม ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมกับดีเซล	47
4.7 ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมในช่วงอุณหภูมิ 40-90°C	50
4.8 สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลสูงสุด ที่ช่วงอุณหภูมิ 40-90°C โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย	68
4.9 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C	69
4.10 สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลสูงสุด ที่ช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C โดยที่ความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย	90
4.11 ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมเมื่อวางไว้ในบรรยากาศ 1-14 วัน (vol.%)	92

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ ที่บรวมน โดยที่เชื้อเพลิงผสมมีความหนืด และความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซล ประเภทต่างๆ ของไทยและไม่เป็นไขเมื่อวางไว้ 14 วัน ข้อมูลได้จากผลการทดลอง (vol.%)	104
4.13 สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ ที่บรวมน โดยที่เชื้อเพลิงผสมมีความหนืด และความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซล ประเภทต่างๆ ของไทยและไม่เป็นไขเมื่อวางไว้ 14 วัน ข้อมูลได้จากผลการทำนาย (vol.%)	105
4.14 รายการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดและห้องปฏิบัติการที่ทดสอบ	108
4.15 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย	109
ข.1 ค่าคงที่สำหรับใช้คำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล	144
ณ.1 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็ว รอบคงที่ 2,200 rpm	153
ณ.2 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ที่การเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็ว รอบคงที่ 1,600-2,400 rpm	157

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ความต้องการพลังงานของประเทศไทย	6
2.2 ความต้องการพลังงานแต่ละชนิดของประเทศไทย	6
2.3 สัดส่วนความต้องการพลังงานแต่ละชนิดของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 ถึง พ.ศ. 2552	7
2.4 ราคาดีเซล	7
2.5 ราคาผลผลิตจากปาล์มน้ำมัน	8
2.6 ผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มกับราคาขายน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	11
2.7 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	14
2.8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	15
2.9 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน	15
2.10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	15
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	28
3.2 ชุดการผลิต	29
4.1 สัดส่วนราคาวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	40
4.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม	44
4.3 ชนิดกรดไขมันของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดหย่นเหนียวและลดกรด	45
4.4 น้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิงผสม	48
4.5 ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมในท่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	52
4.6 ความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40°C (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)	54
4.7 ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ต่อผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)	55
4.8 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A	59
4.9 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ B	59
4.10 ความหนืดจลศาสตร์ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดหย่นเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)	61

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ต่อผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)	61
4.12 ความหนืดจลศาสตร์ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)	64
4.13 ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ต่อผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)	64
4.14 สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ	67
4.15 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในทอมน้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ย (เชื้อเพลิง 4 ชนิด)	71
4.16 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในทอมน้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ย (เชื้อเพลิง 3 ชนิด และเมทิลเอสเตอร์)	72
4.17 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในทอมน้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ย (เชื้อเพลิง 3 ชนิด)	73
4.18 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในทอมน้ำหนัก โมเลกุลเฉลี่ย (เมทิลเอสเตอร์)	73
4.19 ความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่างๆ (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)	76
4.20 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสม (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)	77
4.21 ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)	80
4.22 ความหนาแน่นของเมทิลเอสเตอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)	80
4.23 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)	81
4.24 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเมทิลเอสเตอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)	81
4.25 ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)	83
4.26 ความหนาแน่นของเมทิลเอสเตอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)	83

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)	84
4.28 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)	84
4.29 สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ	88
4.30 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดหย่อนเชิงผสมในดีเซล (1-14 วัน)	93
4.31 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดหย่อนเชิงและลดกรดผสมในดีเซล (1-14 วัน)	93
4.32 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ผสมในดีเซล (1-14 วัน)	94
4.33 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงผสม ณ วันที่ 14	94
4.34 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย	96
4.35 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงผสมในเทอมการมีอยู่ของไตรกลเซอไรด์ (TG)	97
4.36 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงผสมในเทอมการมีอยู่ของไตรกลเซอไรด์ (TG) และเมทิลเอสเทอร์ (ME)	99
4.37 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงผสมในเทอมการมีอยู่ของไตรกลเซอไรด์ (TG) เมทิลเอสเทอร์ (ME) และกรดไขมันอิสระ (FFA)	100
4.38 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงผสมในเทอมการมีอยู่ของไตรกลเซอไรด์ (TG) เมทิลเอสเทอร์ (ME) กรดไขมันอิสระ (FFA) และไดกลีเซอไรด์ (DG)	101
4.39 เงื่อนไขการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซลในเทอมการมีอยู่ของไตรกลเซอไรด์ (TG) เมทิลเอสเทอร์ (ME) กรดไขมันอิสระ (FFA) และไดกลีเซอไรด์ (DG)	102
4.40 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	112
4.41 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	112
4.42 สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	113
4.43 สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	113
4.44 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียในไอเสีย (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	115

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียในไอเสีย (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	115
4.46 อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	117
4.47 อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	117
4.48 แรงบิดของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	120
4.49 กำลังเบรคของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	120
4.50 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	121
4.51 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	121
4.52 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	122
4.53 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	122
4.54 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	126
4.55 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	126
4.56 ปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)	127
4.57 ปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)	127

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
B	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
cf	=	ต้นทุนเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 1 ลิตร (บาท/ลิตร)
cm_i	=	ต้นทุนวัตถุดิบแต่ละชนิด i ที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 1 ลิตร (บาท/หน่วย)
C	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
C_1	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ 5.08662×10^{-3}
C_2	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ 8.96615×10^{-3}
C_3	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ 1.20440
C_4	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ 3.40432×10^{-1}
D_1	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ 8.65628×10^{-9} สำหรับเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และ 3.08034×10^{-9} สำหรับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล
D_2	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ 2.19015×10^{-6} สำหรับเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และ 1.57309×10^{-6} สำหรับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล
D_3	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ -1.10872×10^{-3} สำหรับเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และ -9.27871×10^{-4} สำหรับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล
D_4	=	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะมีค่าเท่ากับ 1.01670 สำหรับเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และ 1.01414 สำหรับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล
$f_{i,B}$	=	สัดส่วนโดยมวลของโมเลกุล i ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)
$f_{i,MCPOF}$	=	สัดส่วนโดยมวลของโมเลกุล i ในเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (wt.%)
i	=	องค์ประกอบ โมเลกุลที่คำนวณ ประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และเมทิลเอสเทอร์
m	=	มวล (kg)
\dot{m}	=	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/hr)
μ	=	ความหนืดพลวัต (N.s/m ²)
μ_i	=	ความหนืดพลวัตของเหลวแต่ละองค์ประกอบ i
μ_m	=	ความหนืดพลวัตเฉลี่ยของเหลวผสม
n	=	จำนวน

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

n_i	=	จำนวนวัตถุดิบแต่ละชนิด i ที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 1 ลิตร (หน่วย)
N	=	ความเร็วรอบ (rpm)
η_{bth}	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (%)
P	=	กำลังเบรคของเครื่องยนต์ (kW)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
ρ_o	=	ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิอ้างอิง (kg/m^3)
ρ_i	=	ความหนาแน่นของของเหลวแต่ละองค์ประกอบ i (kg/m^3)
ρ_m	=	ความหนาแน่นเฉลี่ยของของเหลวผสม (kg/m^3)
$\rho_{B,15.6}$	=	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ 15.6°C (kg/m^3)
ρ_D	=	ความหนาแน่นของดีเซล (kg/m^3)
$\rho_{D,15.6}$	=	ความหนาแน่นของดีเซลที่อุณหภูมิ 15.6°C (kg/m^3)
$\rho_{F,15.6}$	=	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน้ำมันที่อุณหภูมิ 15.6°C (kg/m^3)
ρ_{MCPOF}	=	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน้ำมัน (kg/m^3)
$\rho_{St,15.6}$	=	ความหนาแน่นสูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน 900 kg/m^3 สำหรับดีเซลเครื่องยนต์ การเกษตร 920 kg/m^3 สำหรับดีเซลหมุนช้า และ 870 kg/m^3 สำหรับดีเซลหมุนเร็ว
ρ_T	=	ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (kg/m^3)
Q_{ij}	=	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวผสม
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส
R^2	=	Coefficient of Determination หรือ R-squared
T	=	อุณหภูมิ (K)
v	=	ปริมาตร (m^3)
\dot{v}	=	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยปริมาตร (m^3/hr)
V	=	สัดส่วนการผสมโดยปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน้ำมันผสมในดีเซล (decimal)
V_o	=	ปริมาตรของเหลวที่อุณหภูมิอ้างอิง (m^3)
V_F	=	สัดส่วนปริมาตรของเชื้อเพลิงในดีเซล (decimol)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

V_F	=	สัดส่วนปริมาตรของเชื้อเพลิงในดีเซล (decimol)
$V_{F \max}$	=	สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลสูงสุด (vol.%)
V_i	=	สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบ i (decimol)
V_T	=	ปริมาตรของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (m^3)
ν	=	ความหนืดจลศาสตร์ (m^2/s)
ν_{40}	=	ความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ $40^\circ C$ (cSt)
ν_i	=	ความหนืดจลศาสตร์ของเหลวแต่ละองค์ประกอบ i (cSt)
ν_m	=	ความหนืดจลศาสตร์เฉลี่ยของเหลวผสม (cSt)
$\nu_{B,40}$	=	ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ $40^\circ C$ (cSt)
$\nu_{B,T}$	=	ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิต่างๆ (cSt)
$\nu_{D,40}$	=	ความหนืดจลศาสตร์ดีเซลที่อุณหภูมิ $40^\circ C$ (cSt)
$\nu_{F,40}$	=	ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิ $40^\circ C$ (cSt)
$\nu_{St,40}$	=	ความหนืดจลศาสตร์สูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน 8.0 cSt สำหรับดีเซลหมุนช้าและดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร 8.0 cSt สำหรับดีเซลหมุนเร็ว
ν_T	=	ความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ T (cSt)
W	=	แรงบิด (lbf.ft)
x	=	สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงในดีเซล (vol.%)
x_{\exp}	=	ผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง
x_i	=	สัดส่วนโมลขององค์ประกอบ i
x_j	=	สัดส่วนโมลขององค์ประกอบ j
x_{sim}	=	ผลการทำนายคุณสมบัติเชื้อเพลิง
y	=	ปริมาณการไต่คีน (%vol. basis)
\hat{y}	=	ค่าที่ได้จากการทำนาย
y_i	=	ค่าที่ได้จากการทดสอบ
ASTM	=	American Society of Testing Material
BHP	=	กำลัง (HP)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

<i>BSFC</i>	=	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ (kg/kW-hr)
CPKO	=	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม
CPO	=	น้ำมันปาล์มดิบ
DG	=	ไดกลีเซอไรด์
<i>DG</i>	=	สัดส่วนของไดกลีเซอไรด์ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)
FFA	=	กรดไขมันอิสระ
<i>FFA</i>	=	สัดส่วนของกรดไขมันอิสระในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)
GC/FID	=	Gas Chromatography / Flame Ionize Detector
<i>LHV</i>	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
MCPO	=	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม
ME	=	เมทิลเอสเตอร์
<i>ME</i>	=	สัดส่วนของเมทิลเอสเตอร์ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)
MG	=	โมโนกลีเซอไรด์
<i>MRD</i>	=	ค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
PFAD	=	เมทิลเอสเตอร์จากกรดไขมันปาล์ม
SS_R	=	The regression sum of squares
SS_T	=	The sum of squares
TG	=	ไตรกลีเซอไรด์
<i>TG</i>	=	สัดส่วนของไตรกลีเซอไรด์ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)
TLC/FID	=	Thin Layer Chromatography / Flame Ionization Detector
ΔG_n	=	พลังงานอิสระของคาร์บอนอะตอม
ΔG_{vis}	=	พลังงานกระตุ้นของการไหล
ΔH°	=	ค่าของเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง
ΔS°	=	ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลง
δG	=	พลังงานอิสระที่เพิ่มขึ้นต่อจำนวนอะตอมคาร์บอน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในรอบหลายปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่แหล่งพลังงานสำรองมีอยู่จำกัด จึงต้องนำเข้าพลังงานส่วนหนึ่งจากต่างประเทศ ดิเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีความต้องการสูงสุด และมีราคาไม่คงที่ โดยราคาดิเซลจะเปลี่ยนแปลงตามต้นทุนน้ำมันดิบที่นำเข้าเป็นหลัก นอกจากนี้ยังเปลี่ยนแปลงตามความต้องการพลังงานทั่วโลก ด้วยเหตุนี้ จึงควรพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถผลิตได้ในประเทศ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่น่าสนใจ นิยมปลูกมากในพื้นที่ภาคใต้ของไทย และให้น้ำมันสูงที่สุดในจำพวกพืชน้ำมันทุกชนิด ผลปาล์มประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนเมล็ดในกับส่วนเยื่อเส้นใย ส่วนเมล็ดใน เมื่อหีบได้น้ำมันที่เรียกว่า น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Crude Palm Kernel Oil: CPKO) ส่วนเยื่อข้างนอกหรือส่วนเยื่อเส้นใย เมื่อหีบได้น้ำมันที่เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil: CPO) ในโรงงานขนาดใหญ่จะหีบน้ำมันสองส่วนแยกกัน เนื่องจากน้ำมันเมล็ดในมีราคาสูง แต่ในโรงงานขนาดเล็ก คริวเรือน หรือกลุ่มเกษตรกร นิยมหีบผลปาล์มรวมกัน ซึ่งจะได้น้ำมันที่เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (Mixed Crude Palm Oil: MCPO) การใช้น้ำมันปาล์มทดแทนดิเซล เป็นการพัฒนาประเทศที่ยั่งยืน เพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน ส่งผลดีต่อระบบเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม (ศิวัชพงศ์, 2550) แต่การใช้น้ำมันปาล์มในเครื่องยนต์โดยตรงยังพบปัญหาการใช้งาน โดยเฉพาะน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมมีความหนืดสูง เป็นไข มีสภาพเป็นกรด และมียางเหนียวเป็นส่วนประกอบ (Leevijit and Prateepchaikul, 2011)

โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดิเซลต้องมีคุณสมบัติสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ คุณสมบัติการเผาไหม้ คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ และความสะอาดของเชื้อเพลิง (Lepera, 1982)

คุณสมบัติการเผาไหม้ที่สำคัญที่สุดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดิเซล คือ ค่าซีเทน (Lepera, 1982) จากการทบทวนเอกสารค่าซีเทนของดิเซลอยู่ในช่วง 45-52 ค่าซีเทนของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มอยู่ในช่วง 42-62

คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิง มีหลายประเภท ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น การไม่เป็นไข จุดขุ่น และจุดไหลเท โดยคุณสมบัติการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงที่สำคัญมากที่สุดสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดิเซล คือ ความหนืด ส่วนคุณสมบัติความสะอาดของเชื้อเพลิง ขึ้นกับความสะอาดในกระบวนการผลิตเป็นหลัก (Lepera, 1982)

ความหนืด แบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ ความหนืดจลศาสตร์ และความหนืดพลวัต ความหนืดพลวัต เป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล การหาค่าความหนืดพลวัต ต้องใช้ความหนืดจลศาสตร์ ร่วมกับความหนาแน่น

ความหนาแน่น เป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเชื้อเพลิง ใช้ทำนาย ความหนืดพลวัต ค่าซีเทน ค่าความร้อน และออกแบบระบบจ่ายน้ำมันที่หัวฉีด

การไม่เป็นไข เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในงานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยธรรมชาติเชื้อเพลิงบางชนิดเป็นสารละลายผสม ประกอบด้วย องค์ประกอบหลายส่วน ซึ่งองค์ประกอบที่แตกต่างกันจะเป็นไขที่อุณหภูมิไม่เท่ากัน (Chen et al., 2010; Letoffe et al., 1995) สำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เมื่อวางในบรรยากาศปกติ น้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีขุ่นในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ น้ำมันส่วนหนึ่งเริ่มรวมตัวเป็นก้อนไข และตกลงสู่ด้านล่างภาชนะ ส่วนไขของน้ำมันจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา การนำเชื้อเพลิงที่เป็นไขไปใช้งาน เมื่อเครื่องยนต์หยุดเดินระยะหนึ่ง ไขที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดการอุดตันบริเวณท่อหรือทางเดินน้ำมัน ส่งผลให้เครื่องยนต์ไม่สามารถใช้งานได้

สำหรับประเทศไทย กรมธุรกิจพลังงาน ได้กำหนดคุณสมบัติความหนืดจลศาสตร์ และความหนาแน่น ตามมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ได้แก่ ดีเซลหมุนเร็ว ดีเซลหมุนช้า ไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร หรือดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร ดังตารางที่ 1.1 ซึ่งมาตรฐานดีเซลทั้งหมด เป็นมาตรฐานสำหรับการใช้งาน ยกเว้นไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เป็นมาตรฐานที่ใช้ควบคุมคุณภาพการผลิตไบโอดีเซล ก่อนการผสมในดีเซล

ตารางที่ 1.1 มาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน, 2549, 2550, 2554)

ประเภทดีเซล	ความหนืดจลศาสตร์ที่ 40°C (cSt)		ความหนาแน่นที่ 15.6°C (kg/m ³)	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
ดีเซลหมุนเร็ว	1.8	4.1	810	870
ดีเซลหมุนช้า	-	8.0	-	920
ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	3.5	5.0	860	900
ดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร	1.9	8.0	860	900

ด้วยเหตุนี้จึงปรับปรุงคุณลักษณะการเป็นของเหลวของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่เหมาะสมตามมาตรฐาน การปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงเหลวมีหลายวิธี เช่น การลดขางเหนียว การลดกรด (การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน) การแยกไข การอุ่นน้ำมัน การทำปฏิกิริยา

เอสเตอริไฟเคชัน การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริไฟเคชัน การใช้สารเติมแต่ง และการผสมดีเซล (กิตติศักดิ์, 2549; มณีชนก, 2552; Ramadhas et al., 2004) แต่การปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงเหลว แต่ละวิธีมีกระบวนการผลิต และต้นทุนไม่เท่ากัน นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่ผลิตได้ยังมีองค์ประกอบ เชื้อเพลิงไม่เหมือนกัน ส่งผลให้คุณลักษณะการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงที่ผลิตแตกต่างกัน

งานวิจัยนี้ นำเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอริไฟน์ และเมทิลเอสเตอริไฟน์ เปรียบเทียบการผลิต ต้นทุน และองค์ประกอบเชื้อเพลิง และนำเชื้อเพลิง เหล่านี้ผสมในดีเซล ทดสอบความหนืดจลศาสตร์และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ ต่างๆ เปรียบเทียบมาตรฐานดีเซล และนำผลการทดสอบดังกล่าว สร้างสมการทำนายสัดส่วน การผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ นอกจากนี้ ยังศึกษา คุณลักษณะการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ที่สภาวะแวดล้อมบรรยากาศ และเลือก เชื้อเพลิงผสมที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรระยะสั้น เปรียบเทียบดีเซล

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เปรียบเทียบการผลิต ต้นทุน และองค์ประกอบเชื้อเพลิง ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจาก น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

1.2.2 ศึกษาคุณลักษณะการเป็นของเหลว ได้แก่ ความหนืดจลศาสตร์ ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ผสมในดีเซล

1.2.3 ศึกษาศักยภาพด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรระยะสั้น เมื่อใช้เชื้อเพลิงผสม ที่ผ่านการวิเคราะห์การผลิต ต้นทุน และคุณสมบัติความหนืดจลศาสตร์ ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข เปรียบเทียบมาตรฐานดีเซล

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทราบการผลิต ต้นทุน และองค์ประกอบเชื้อเพลิง ของเชื้อเพลิงทั้งหมด

1.3.2 จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง สมการทำนาย และเหตุผลอธิบาย เกี่ยวกับคุณลักษณะ ความหนืดจลศาสตร์ ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ผสมในดีเซล จะสร้างความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรม ความหนืด ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิงผสม และสามารถประยุกต์ใช้ทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิง ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

1.3.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงผสม ที่ผ่านการวิเคราะห์การผลิต ต้นทุน และคุณสมบัติความหนืดจลศาสตร์ ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข เปรียบเทียบมาตรฐาน ดีเซล จะได้ผลเปรียบเทียบตัวแปรบ่งชี้สมรรถนะเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นข้อมูลทางเลือกสำหรับการใช้งาน และเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลต้นทุนต่ำต่อไป

บทที่ 2

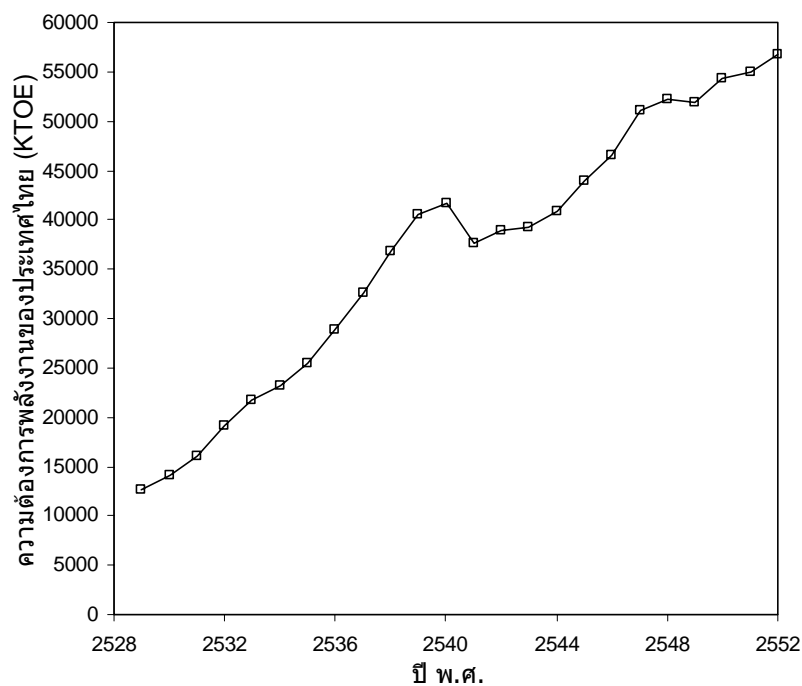
การตรวจเอกสาร

ในบทนี้ เนื้อหาถูกแบ่งเป็นหลายส่วนสำคัญ ส่วนที่หนึ่งจะกล่าวถึง ต้นทุนดีเซล และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เพื่อใช้เปรียบเทียบผลต่างราคา ส่วนที่สอง การผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลชนิดต่างๆ ส่วนที่สาม องค์ประกอบเชื้อเพลิง ได้แก่ องค์ประกอบ และองค์ประกอบกรดไขมัน ส่วนที่สี่ คุณสมบัติค่าซีเทนของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์ม ส่วนที่ห้า คุณลักษณะการเป็นของเหลวที่สำคัญของเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข และส่วนที่หก จะกล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ซึ่งการตรวจเอกสารทั้งหมดในบทนี้ จะทำให้ทราบความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบัน และช่องว่างความรู้ที่ยังไม่ได้ศึกษาของการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยช่องว่างความรู้ที่ยังไม่ได้ศึกษาจะถูกทดสอบและเติมเต็มในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

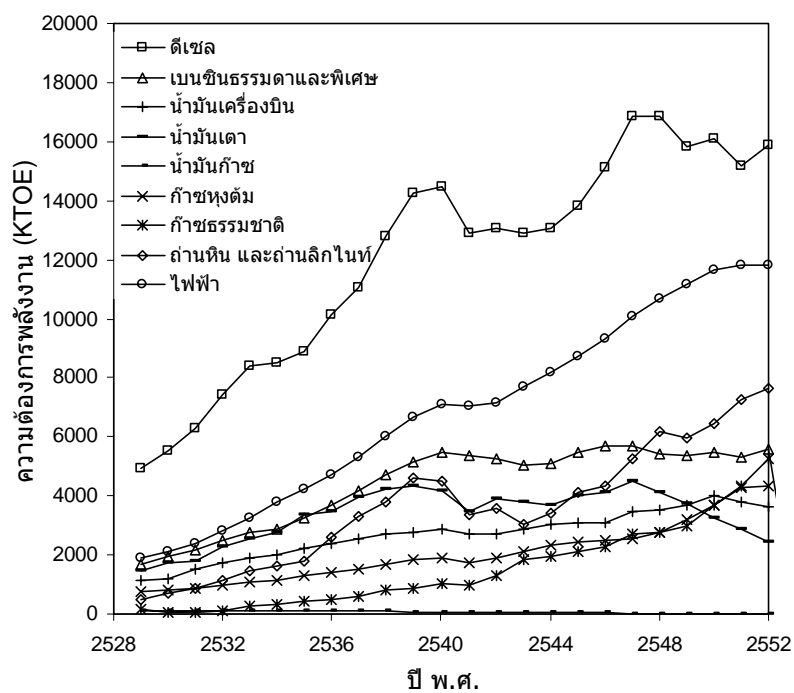
2.1 ต้นทุนดีเซลและน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

ในรอบหลายปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.1 เมื่อจำแนกความต้องการเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 จะเห็นได้ว่า ดีเซลมีความต้องการสูงที่สุด คิดเป็น 32.95% ของความต้องการพลังงานทั้งหมด (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553) เมื่อพิจารณาราคาดีเซล ในปี พ.ศ. 2539 ถึง พ.ศ. 2553 ราคาดีเซลมีแนวโน้มปรับตัวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.4 (การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553)

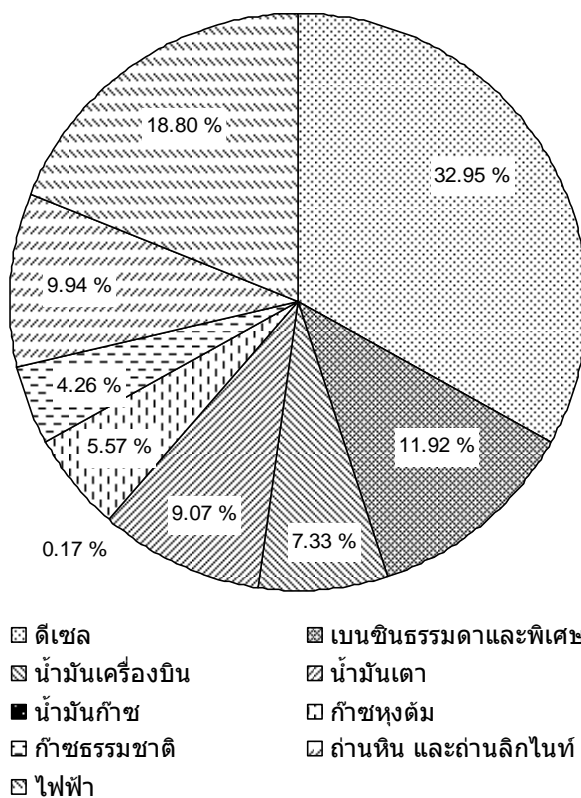
สำหรับประเทศไทย สำนักงานนโยบายพลังงานได้กำหนดโครงสร้างราคาน้ำมันภายในประเทศ ดังนี้ 1. ราคานำเข้าน้ำมันสำเร็จรูป ประกอบด้วย ราคาน้ำมันในตลาดจรที่สิงคโปร์ (FOB) ค่าประกันภัยการขนส่งน้ำมันทางเรือ ค่าความสูญหาย ค่าระวางหรือค่าขนส่ง ค่าจัดเก็บน้ำมัน และภาษีศุลกากรนำเข้าน้ำมัน 2. ราคาขายส่งหน้าโรงกลั่น ประกอบด้วย ราคานำเข้าน้ำมันสำเร็จรูป ภาษีสรรพสามิต ภาษีเทศบาล และภาษีมูลค่าเพิ่มของราคาขายส่งหน้าโรงกลั่น นอกจากนี้รัฐยังเก็บเงินเข้ากองทุนน้ำมันเชื้อเพลิง และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน 3. ราคาขายปลีก ณ สถานีบริการ ประกอบด้วย ราคาขายส่งหน้าโรงกลั่น ภาษีมูลค่าเพิ่มของราคาขายปลีกน้ำมัน ณ สถานีบริการ และค่าการตลาด ซึ่งค่าการตลาดยังแบ่งย่อยได้อีก ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินธุรกิจ ค่าขนส่งน้ำมัน ค่าใช้จ่ายสำหรับสารปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน ค่าใช้จ่ายส่งเสริมการขาย และค่าตอบแทนจากการลงทุน



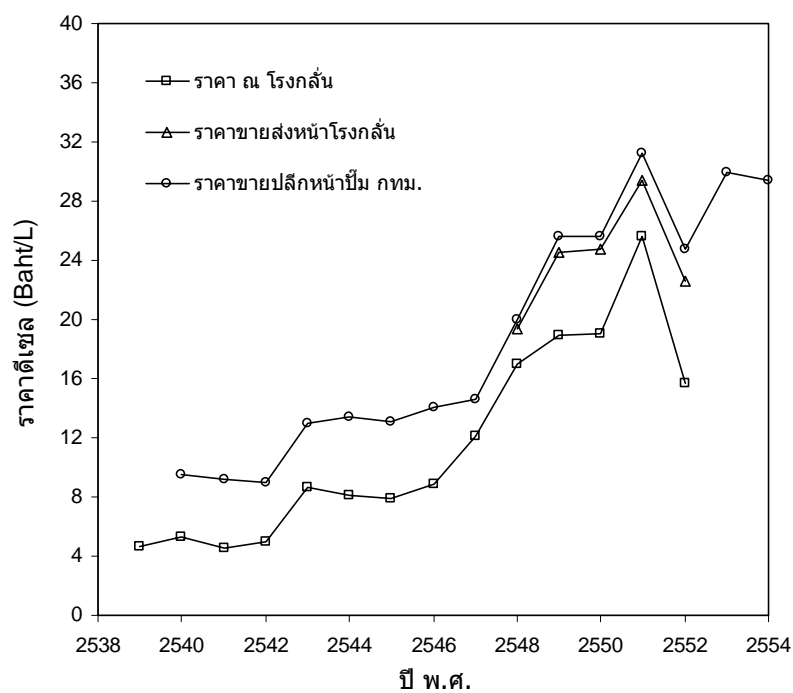
รูปที่ 2.1 ความต้องการพลังงานของประเทศไทย



รูปที่ 2.2 ความต้องการพลังงานแต่ละชนิดของประเทศไทย



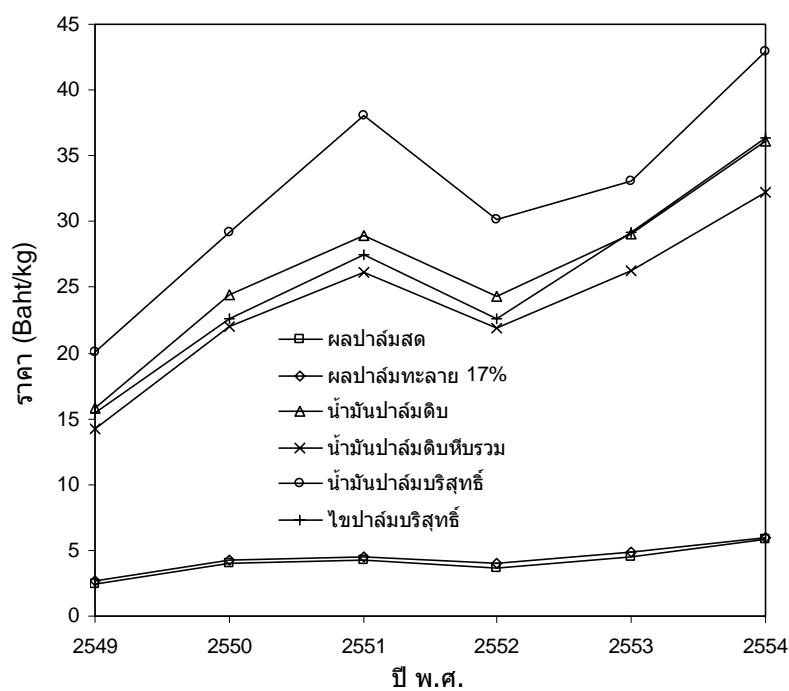
รูปที่ 2.3 สัดส่วนความต้องการพลังงานแต่ละชนิดของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 ถึง พ.ศ. 2552



รูปที่ 2.4 ราคาดีเซล

โดยสรุปโครงสร้างราคาน้ำมันภายในประเทศไทย ประกอบด้วย 1. ต้นทุนซื้อน้ำมันจากโรงกลั่นหรือนำเข้าจากต่างประเทศ ($\approx 50-60\%$ ของราคาขายปลีกน้ำมัน ณ สถานีบริการ) 2. เงินภาษีและกองทุนที่รัฐเรียกเก็บจากผู้ค้า ($\approx 30-35\%$ ของราคาขายปลีกน้ำมัน ณ สถานีบริการ) และ 3. ค่าการตลาด ($\approx 10\%$ ของราคาขายปลีกน้ำมัน ณ สถานีบริการ) อย่างไรก็ตาม จากโครงสร้างราคาน้ำมันที่กล่าวมา ถ้าราคาน้ำมันส่วนต่างๆ ทอยปรับตัวสูงขึ้นพร้อมกัน จะส่งผลให้ราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นทวีคูณ แต่ทั้งนี้การปรับราคาน้ำมันยังขึ้นกับนโยบายภาครัฐ และอัตราแลกเปลี่ยนเงินบาท จากเหตุผลดังกล่าวจึงควรพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถผลิตได้ในประเทศ เพื่อลดการขาดดุลการค้าจากการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ และช่วยเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ นิยมปลูกมากทางภาคใต้ของไทย ให้น้ำมันเฉลี่ย 2.46 ตัน/ไร่/ปี (Chavananand, 2011) มากที่สุดในจำพวกพืชน้ำมันทุกชนิด และมีความต้องการทั่วโลกประมาณ 33% ของพืชน้ำมันทั้งหมด (Sumathi et al., 2008) สำหรับประเทศไทย มีความต้องการบริโภคน้ำมันปาล์มเป็นอาหารและเชื้อเพลิงประมาณ 2% ของการบริโภคทั่วโลก (Sumathi et al., 2008) ในปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2553 ผลปาล์มและน้ำมันปาล์มภายในประเทศ มีราคาขายเฉลี่ย ดังรูปที่ 2.5 (สำนักงานส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร, 2555)



รูปที่ 2.5 ราคาผลผลิตจากปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 จะเห็นได้ว่า ราคาผลปาล์ม และน้ำมันปาล์ม จะปรับตัวตามราคาดีเซลเป็นหลัก โดยในปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2551 ราคาผลปาล์ม น้ำมันปาล์ม และดีเซล จะปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งดีเซลมีราคาสูงสุดที่ 42.64 บาท/ลิตร ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2551 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551) แต่ในปี พ.ศ. 2552 ราคาน้ำมันทั้งหมดกลับลดลง ปัจจัยหลักเกิดจากวิกฤตการณ์การเงินโลก (วิกฤตการณ์แฮมเบอร์เกอร์) ส่งผลให้ความต้องการน้ำมันทั่วโลกลดลง สำหรับปี พ.ศ. 2553 เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันปาล์มขาดแคลน เนื่องจากสถานการณ์ภัยแล้งช่วงต้นปี ทำให้ผลผลิตปาล์มตกต่ำ ประกอบกับปลายปีเกิดสถานการณ์น้ำท่วมภาคใต้หลายจังหวัด ทำให้เกษตรกรไม่สามารถเก็บผลผลิตได้ ผลปาล์มสดที่เก็บได้ในปี พ.ศ. 2553 จึงต่ำกว่าการคาดการณ์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สศก.) 19% ส่งผลให้ต้นปี พ.ศ. 2554 เกิดภาวะขาดแคลนน้ำมันปาล์มคงคลัง ราคาน้ำมันปาล์มจึงเพิ่มสูงขึ้นสุดเป็นประวัติการณ์ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)

เมื่อพิจารณาราคาดีเซล และผลผลิตจากปาล์มน้ำมันเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2554 โดยบวกราคาขนส่งน้ำมันเพิ่มเติม (ราคาขนส่งน้ำมันแปรผันตามระยะทางและความสูงของพื้นที่) ดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า ผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊ม (ทั่วประเทศและภาคใต้) กับราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเฉลี่ยอยู่ที่ 6.32-6.35 บาท/ลิตร คิดเป็น 22.43-22.52% ของราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊ม ผลต่างราคาดังกล่าวเมื่อคำนวณกับปริมาณความต้องการดีเซลในแต่ละปี (รูปที่ 2.2) จะพบช่องว่างทางการตลาดที่เป็นโอกาสทางธุรกิจสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลต้นทุนต่ำจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ซึ่งจะช่วยลดการนำเข้าดีเซลจากต่างประเทศ และยังช่วยเหลือกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกปาล์ม

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแนวโน้มผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มกับราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในทุกๆ ปี ดังรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า ผลต่างราคามีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะผลต่างราคา ณ ปัจจุบัน ซึ่งมีความแตกต่างน้อยมากประมาณ 0.22-0.25 บาท/ลิตร ผลต่างราคาดังกล่าวแทบไม่มีความคุ้มค่าสำหรับการลงทุนผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เนื่องจากการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลยังต้องเพิ่มต้นทุนวัตถุดิบสารเคมี และพลังงาน

แต่ด้วยเหตุผลใดก็ตาม งานวิจัยนี้จะศึกษาต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยใช้ราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม 5 ปีย้อนหลังเฉลี่ย (ตารางที่ 2.1) คำนวณต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล นอกจากนี้ยังทำนายราคาเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่เปลี่ยนแปลงตามราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

ตารางที่ 2.1 ราคาดีเซล และผลผลิตจากปาล์มน้ำมันเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 ถึง พ.ศ. 2552 (กรมทางหลวง; การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553; สำนักงานส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร; ราคากลางโยธาไทย)

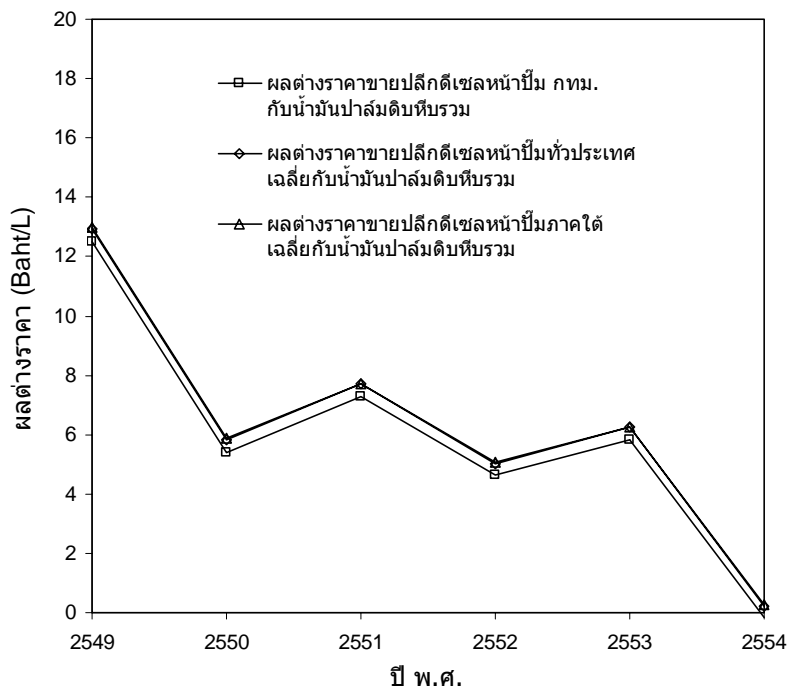
รายการ	หน่วย
ราคาดีเซล ณ โรงกลั่นเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	19.80
ราคาขายส่งดีเซลหน้าโรงกลั่นเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	25.31
ราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊ม กทม. เฉลี่ย (บาท/ลิตร)	27.77
ราคาขนส่งน้ำมันทั่วประเทศเฉลี่ย (บาท/กิโลเมตร-ลิตร)	0.0009
ระยะทางจาก กทม. ถึงอำเภอเมือง จังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศเฉลี่ย (กิโลเมตร)	448.92
ราคาขนส่งน้ำมันทั่วประเทศเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	0.41
ราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มทั่วประเทศเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	28.18
ราคาขนส่งน้ำมันภาคใต้เฉลี่ย (บาท/กิโลเมตร-ลิตร)	0.0005
ระยะทางจาก กทม. ถึงอำเภอเมือง จังหวัดต่างๆ ภาคใต้เฉลี่ย (กิโลเมตร)	842.71
ราคาขนส่งน้ำมันภาคใต้เฉลี่ย (บาท/ลิตร)	0.44
ราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มภาคใต้เฉลี่ย (บาท/ลิตร)	28.21
ราคาผลปาล์มสดเฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)	4.09
ราคาผลปาล์มทะลาย 17% เฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)	4.39
ราคาน้ำมันปาล์มดิบเฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)	26.46
ราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)	23.81
ราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	21.86
ราคาน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)	32.25
ราคาไขปาล์มบริสุทธิ์เฉลี่ย (บาท/กิโลกรัม)	25.61
ผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊ม กทม. กับราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	5.91
ผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มทั่วประเทศกับราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	6.32
ผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มภาคใต้กับราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเฉลี่ย (บาท/ลิตร)	6.35

2.2 การผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล

ในการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล มีวิธีการผลิตหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีต้นทุนการผลิตไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารูปแบบการใช้้ำมันพืชทดแทนดีเซลในเครื่องยนต์ สามารถจำแนกลักษณะการใช้งาน ดังนี้

1. การนำน้ำมันพืชใช้ในเครื่องยนต์โดยตรง วิธีนี้ใช้ได้เฉพาะเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ แต่เครื่องยนต์ที่ใช้วิธีนี้ พบความเสียหายค่อนข้างสูง เนื่องจากน้ำมันพืชมีคุณสมบัติแตกต่างจากดีเซลมาก

2. การผสมตามสัดส่วน หรือการเจือจาง วิธีนี้ใช้ได้เฉพาะตัวทำละลายเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเท่านั้น เช่น น้ำมันพืชผสมในดีเซล



รูปที่ 2.6 ผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มกับราคาขายน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

3. การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันพืช ประกอบด้วย การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน หรือ การอุ่นน้ำมัน และการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการเคมี เช่น การลดยางเหนียว การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (การลดกรด) การแยกไข การทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน การใช้สารเติมแต่ง (กิตติศักดิ์, 2549; มณีชนก, 2552; Ramadhas et al., 2004) ตัวอย่างการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันพืช หรือการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ด้วยกระบวนการเคมี

1) การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ทำได้ดังนี้ ละลายกรดฟอสฟอริก 0.25 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ในน้ำ 2.25 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม นำสารละลายที่ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิ 80°C พร้อมทั้งให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120°C กวนผสมเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบ 30 นาที สเปรย์น้ำร้อนลงในส่วนผสม พร้อมทั้งกวนผสมอีก 5 นาที เมื่อครบ 5 นาที แยกยางเหนียวออก นำน้ำมันที่ได้ล้างน้ำและอุ่นใส่น้ำที่อุณหภูมิ 120°C ประมาณ 30 นาที จะได้น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว (กิตติศักดิ์, 2549)

2) การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ด้วยการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทำปฏิกิริยาลดยางเหนียว และการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน การทำปฏิกิริยาลดยางเหนียวในขั้นตอนที่หนึ่ง ละลายกรดฟอสฟอริก 0.25 vol.%

ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ในน้ำ 2.25 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม นำสารละลายที่ได้ ทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิ 80°C เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น แยกชั้นของเสีย ออกจากน้ำมัน และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวที่ได้ ไปทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ในขั้นตอนที่สอง โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (สัดส่วนจากการ ไตรเอทิลกรดไขมันอิสระในน้ำมัน) ละลายในน้ำ 10 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว นำสารละลายที่ได้ทำปฏิกิริยากับ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวที่อุณหภูมิ 80°C เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น แยกชั้นของเสีย ออกจากน้ำมัน นำน้ำมันที่ได้ล้างน้ำ และอุ่นไอน้ำ ก็จะได้น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และลดกรด (ทวีศักดิ์, 2554)

3) การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว เป็นการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน การทำ ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนที่หนึ่ง นำน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวทำปฏิกิริยากับ เมทานอล 8 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว โดยใช้กรดซัลฟิวริก 3 wt.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาขั้นตอนนี้สามารถ ลดกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 2 wt.% ภายในเวลา 90 นาที การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ในขั้นตอนที่สอง นำน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวที่ได้จากขั้นตอนแรก ทำปฏิกิริยากับ เมทานอล 16 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 wt.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนการผลิตดังกล่าว สามารถผลิต เมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า 97.5 wt.% ซึ่งการทำปฏิกิริยาทั้งสองขั้นตอน ถูกควบคุม ที่อุณหภูมิ 60°C และความเร็วในการกวนผสม 140 rpm อย่างไรก็ตาม การทำปฏิกิริยา เอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนแรก ถ้าใช้กรดซัลฟิวริกที่สัดส่วน 3 wt.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียว การทำปฏิกิริยาขั้นตอนนี้สามารถลดกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 2 wt.% ภายในเวลา 60 นาที สำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนที่สอง ถ้าใช้เมทานอลที่สัดส่วน 20 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว การทำปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ ที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า 99 wt.% (กิตติศักดิ์, 2549; Prateepchaikul et al., 2007)

4) การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่มีกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 8-14 wt.% ด้วยการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนแรก ใช้เมทานอลเป็น ตัวทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนจำนวนโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 10:1 และใช้กรดซัลฟิวริก 0.8 wt.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาขั้นตอนนี้สามารถลดกรด ไขมันอิสระต่ำกว่า 1 wt.% ภายในเวลา 30 วินาที ส่วนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ในขั้นตอนที่สอง ใช้เมทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของเมทานอลต่อ ไตรกลีเซอไรด์ 6:1 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 wt.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาขั้นตอนที่สอง สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์มีความบริสุทธิ์สูงกว่า 97 wt.% ภายในเวลา 5 นาที ซึ่งการทำปฏิกิริยาทั้งสองขั้นตอน ถูกควบคุมที่อุณหภูมิ 60°C และความเร็วในการกวนผสม 300 rpm (Jansri et al., 2007)

5) การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้เมทานอลที่สัดส่วน 20 wt.% เป็นตัวทำปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สัดส่วน 1 wt.% เท่ากัน การทำปฏิกิริยาทั้งหมดถูกควบคุมตัวแปรต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 65°C เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ความเร็วการกวนผสม 350 rpm ผลการผลิตเมทิลเอสเทอร์ สรุปได้ดังนี้ สำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 wt.% พบว่า ปริมาณการได้คืนสูงสุดอยู่ที่ 89.47% เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ 98.97 wt.% ส่วนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 wt.% มีปริมาณการได้คืนสูงสุด 90.67% เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ 96.16 wt.% (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี)

6) การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยใช้เมทานอลที่สัดส่วน 20 wt.% เป็นตัวทำปฏิกิริยา และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.7 wt.% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาใช้เวลา 30 นาที และควบคุมที่อุณหภูมิ 65°C ผลการผลิตเมทิลเอสเทอร์ พบว่า มีปริมาณการได้คืนสูงสุด 94.67% เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ 90.11 wt.% (ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี)

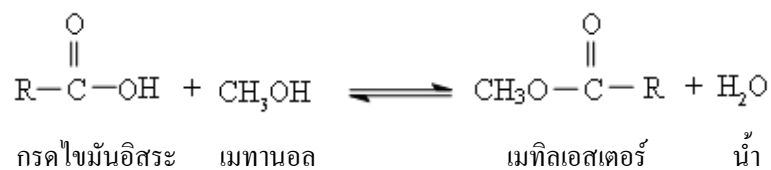
7) การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์ม (PFAD) ที่มีกรดไขมันอิสระสูง (93 wt.%) มีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนหนึ่ง คือ การทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 70°C ด้วยอัตราส่วนจำนวนโมลของเมทานอลต่อ PFAD 8:1 และใช้กรดซัลฟิวริก 1.834 wt.% ของ PFAD เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยานี้สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 2 wt.% ขั้นตอนที่สอง นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำความเข้มข้น 3 โมลาร์ ทำปฏิกิริยากับ PFAD ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ PFAD เป็นกลาง ขั้นตอนที่สาม นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายในเมทานอลความเข้มข้น 0.396 โมลาร์ ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันกับ PFAD ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 15 นาที จะได้เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านมาตรฐานไปโอดีเซลประเทศไทย (Chongkhong et al., 2007)

8) การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มหลายชนิด ได้แก่ น้ำมันทอดใช้แล้ว น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด ไขมันปาล์มสเตอริน และไขมัน

สเตียร์น ชนิด superhard การผลิตนี้เป็นการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบกะ โดยใช้ เมทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยา และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนผลิตทำได้ดังนี้ ขั้นตอนหนึ่ง การเตรียมน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา น้ำมันทั้งหมดที่ใช้ทำปฏิกิริยาต้องผ่านการแยกยางเหนียวและลดกรดไขมันอิสระ ให้ต่ำกว่า 1 wt.% สำหรับน้ำมันทอดใช้แล้วต้องผ่านการกำจัดโปรตีนเพิ่มเติม ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก และล้างด้วยน้ำ จากนั้นนำน้ำมันทั้งหมดอุ่นไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 120°C ประมาณ 20 นาที ยกเว้นไฮปาล์มสเตียร์น ชนิด superhard ถูกกำจัดน้ำออกที่อุณหภูมิ 80°C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ 600-700 mm Hg ขั้นตอนที่สองเตรียมการสารละลายแอลกอฮอล์ นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5-5 wt.% ของเมทานอล ละลายในเมทานอลความบริสุทธิ์ 99 wt.% ขั้นตอนสามการทำปฏิกิริยา ควบคุมอุณหภูมิน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยาที่ 80°C จากนั้นนำสารละลายแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 20 wt.% ของน้ำมัน เติมลงในน้ำมันที่เตรียมไว้ กวนผสม 15 นาที ที่ความเร็วรอบ 500 rpm เมื่อครบ 15 นาที แยกกลีเซอรอลส่วนหนึ่งออกจากน้ำมัน และปล่อยน้ำมันทิ้งไว้ 4 ชม. เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นต่อไปอย่างช้าๆ (ปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากกว่า 95%) ขั้นตอนสี่แยกกลีเซอรอลออกจากน้ำมัน นำน้ำมันล้างน้ำ และอุ่นไอน้ำ จะได้เมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์เกือบ 100 wt.% (ชาคริต และคณะ)

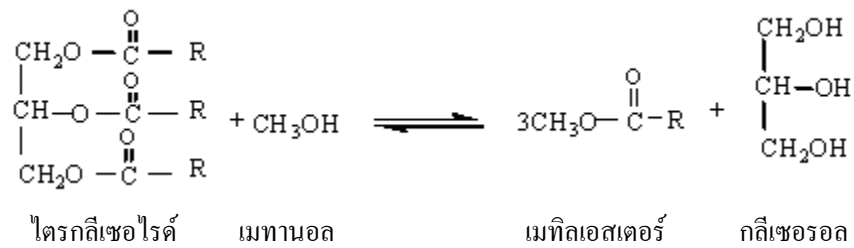
จากการทบทวนเอกสารการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ด้วยกระบวนการเคมีข้างต้น ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการผลิต มีดังนี้

ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระ 1 โมเลกุล กับ เมทานอล 1 โมเลกุล เปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ 1 โมเลกุล กับน้ำ 1 โมเลกุล โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และแยกยางเหนียวออกจากน้ำมัน ดังรูปที่ 2.7 (มณีชนก, 2552)



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ 1 โมเลกุล กับ เมทานอล 3 โมเลกุล เปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ 3 โมเลกุล กับกลีเซอรอล 1 โมเลกุล กระบวนการนี้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.8 (มณีชนก, 2552)



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

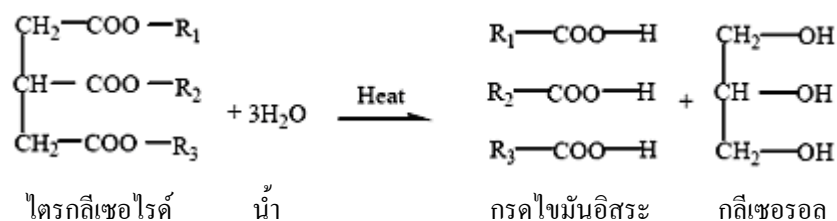
ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาลดความเป็นกรดในน้ำมัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระ 1 โมเลกุล กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมเลกุล เปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นสบู่ ดังรูปที่ 2.9 (มณีชนก, 2552)



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน

โดยทั่วไประหว่าง การทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน และการอุ่นไอน้ำ ของเชื้อเพลิง หรือการตั้งเชื้อเพลิงไว้ จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จากน้ำที่เจือปนอยู่ในสารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยา จากน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน และการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน หรือจากไอน้ำในอากาศ

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เกิดจากไตรกลีเซอไรด์ 1 โมเลกุล ถูกทำปฏิกิริยาด้วยน้ำ 3 โมเลกุล ทำให้ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมเลกุล แตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ 3 โมเลกุล และกลีเซอรอล 1 โมเลกุล ปฏิกิริยานี้เกิดได้รวดเร็วที่อุณหภูมิสูง แสดงดังรูปที่ 2.10 (มณีชนก, 2552)



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

จากการจำแนกการทำปฏิกิริยา ของการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลด้วยกระบวนการเคมี พบว่า การทำปฏิกิริยาลดขนาดของโมเลกุล การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน การทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน และการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน มีความแตกต่างที่ชนิดสารเคมีและปริมาณสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยาเป็นหลัก ปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อปริมาณการได้คีน และการสูญเสียระหว่างการทำปฏิกิริยา เช่น การสูญเสียกรดไขมันอิสระในรูปสบู่ ยิ่งไปกว่านั้น ปัจจัยทั้งหมดส่งผลกระทบต่อต้นทุนเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล

การทบทวนเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดๆ รายงานต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขนาดของโมเลกุล น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขนาดของโมเลกุลและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอริไฟน์ และ เมทิลเอสเตอริ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้จะศึกษาเปรียบเทียบการผลิต และต้นทุน ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

2.3 องค์ประกอบเชื้อเพลิง

การผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ในหัวข้อ 2.2 ที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า การผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลแต่ละชนิดมีการทำปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งการทำปฏิกิริยาแต่ละวิธี ยังขึ้นกับความบริสุทธิ์และสัดส่วนสารเคมี (ตัวทำปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา) อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา และความรุนแรงการกวนผสม จากปัจจัยดังกล่าว ส่งผลให้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ผลิตได้มีองค์ประกอบเชื้อเพลิงไม่เหมือนกัน สำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเริ่มต้น ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์สัดส่วนสูงที่สุด กรดไขมันอิสระสัดส่วนรองลงมา และมีสัดส่วนไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์อีกเล็กน้อย (Jansri, 2007)

เมื่อพิจารณาชนิดกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม จากการทบทวนเอกสาร พบว่า ยังไม่มีการวิเคราะห์ชนิดกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม แต่มีการวิเคราะห์ชนิดกรดไขมันของน้ำมันปาล์มชนิดอื่น ดังตารางที่ 2.2

เพราะฉะนั้น งานวิจัยนี้ จะศึกษาองค์ประกอบเชื้อเพลิง (ชนิดโมเลกุลและชนิดกรดไขมัน) ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป

ตารางที่ 2.2 ชนิดกรดไขมันของน้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันปาล์มโอเลอิน ไซปาล์ม สเตียรีน และส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (wt.%) (ฉกรรจ์, 2550; ชาคริต และคณะ; สีนินาญ, 2549; Chotwchien et al., 2009)

ชนิดกรดไขมัน	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันปาล์ม เมล็ดใน	น้ำมันปาล์ม โอเลอิน	ไซปาล์ม สเตียรีน	ส่วนกลั่น กรดไขมันปาล์ม
Caprylic (C8:0)	0.02	3.35	-	-	-
Capric (C10:0)	0.03	4.65	-	-	-
Lauric (C12:0)	0.30	48.25	-	-	-
Myristic (C14:0)	0.81	16.35	1.19	0.05	1.00
Palmitic (C16:0)	38.12	8.45	27.10	69.12	45.60
Palmitoleic (C16:1)	0.14	5.30	1.78	0.21	0.20
Stearic (C18:0)	3.44	2.40	7.25	7.63	3.80
Oleic (C18:1)	45.96	14.5	42.93	21.72	33.30
Linoleic (C18:2)	10.69	1.60	18.68	1.27	7.70
Linolenic (C18:3)	0.29	-	1.07	-	0.30
Arachidic (C20:0)	0.15	0.95	-	-	-
Ecosenoic (C20:1)	-	-	-	-	0.20
Behenic (C22:0)	0.05	-	-	-	-
Tetracosanoic (C24:0)	-	-	-	-	0.60

2.4 คุณสมบัติค่าซีเทน

จากหัวข้อที่ 2.1 ถึง 2.3 ถึงแม้จะมีการเปรียบเทียบ การผลิต ต้นทุน และองค์ประกอบเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ แต่การผลิตเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ไม่เหมือนกัน ด้วยเหตุนี้จึงควรศึกษาคุณสมบัติเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

คุณสมบัติเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลแบ่งได้ 3 ประเภท ประกอบด้วย คุณสมบัติการเผาไหม้ คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ และความสะอาดของเชื้อเพลิง (Lepera, 1982)

คุณสมบัติการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล ได้แก่ ค่าซีเทน จุดวาบไฟ จุดติดไฟ และการกลั่น โดยคุณสมบัติการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สำคัญมากที่สุดสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล คือ ค่าซีเทน

การใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนเหมาะสม เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ดี และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคสูง การเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนสูงกว่าหรือต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมเล็กน้อย เครื่องยนต์อาจทำงานได้ปกติ แต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์อาจลดลง ถ้าเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนต่ำมากเกินไป กรณีร้ายแรงที่สุด คือ อัตรากา

เผาไหม้ไม่สอดคล้องกับจังหวะการทำงานของเครื่องยนต์ เครื่องยนต์จะเกิดการน็อค จนก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ในทันที

มาตรฐาน American Society of Testing Material (ASTM) กำหนดค่าซีเทนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล ควรอยู่ในช่วง 40-65 (Bekal and Babu, 2008; Ramadhas et al., 2004) สำหรับประเทศไทย กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน กำหนดคุณสมบัติค่าซีเทนในมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ดังนี้ มาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลเครื่องยนต์การเกษตรกำหนดค่าซีเทนของเชื้อเพลิงไม่ต่ำกว่า 47 (ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 กำหนดค่าซีเทนของดีเซลหมุนเร็วไม่ต่ำกว่า 50) มาตรฐานดีเซลหมุนช้ากำหนดค่าซีเทนของเชื้อเพลิงไม่ต่ำกว่า 45 (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน, 2549, 2550, 2554)

จากการทบทวนเอกสารค่าซีเทนของดีเซลอยู่ในช่วง 45-52 (Chen et al., 2008; Haldar et al., 2009; Kalam and Masjuki, 2004; Rakopoulos et al., 2008; Ren et al., 2008) ค่าซีเทนของน้ำมันปาล์มประมาณ 53-59 (Shahid and Jamal, 2007) ค่าซีเทนของน้ำมันปาล์มรีไฟน์ประมาณ 42 (Almeida et al., 2002; Murugesan et al., 2009; Srivastava and Prasad, 2000) ค่าซีเทนของน้ำมันปาล์มเอสเตอร์รีไฟน์ประมาณ 49 (Kalam and Masjuki, 2004) ค่าซีเทนของเมทิลเอสเตอร์จากปาล์มประมาณ 61-62 (Leevijit et al., 2008; Srivastava and Prasad, 2000) เพราะฉะนั้นโดยรวมค่าซีเทนของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มประมาณ 42-62 และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM

2.5 คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ

คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำบ่งบอกความสามารถในการไหลของเชื้อเพลิง สำหรับกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นไข หรืออยู่ในสถานะของแข็ง ไม่สามารถไหลได้ ถือเป็นกรณีร้ายแรงที่สุด ที่เชื้อเพลิงถูกจำกัดโอกาสใช้งานตั้งแต่เริ่มต้น

คุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำของเชื้อเพลิง มีหลายประเภท ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น การไม่เป็นไข จุดขุ่น และจุดไหลเท โดยคุณสมบัติการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงที่สำคัญมากที่สุดสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล คือ ความหนืด และการไม่เป็นไข

ความหนืด คือ ความสามารถต้านทานการไหลของของไหลเมื่อมีแรงกระทำของไหล ความหนืดแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ความหนืดจลศาสตร์ และความหนืดพลวัต ดังตารางที่ 2.3 ความหนืดพลวัตเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ผลการใช้เชื้อเพลิงที่มีความหนืดพลวัตสูงในเครื่องยนต์ เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดในห้องเผาไหม้ จะกระจายตัวในอากาศได้ไม่ดี ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลกระทบต่อ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบอร์ของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ ป้อน้ำมันสูบน้ำมันได้ยาก เกิดคราบเหนียวเกาะตามผิวท่อขัดขวางการไหล เมื่อเชื้อเพลิงมีอัตราการระเหยต่ำและมีความหนืดสูง เครื่องยนต์จะสตาร์ทเย็นได้ยาก (Balat and Balat, 2007; Ramadhas et al., 2004; Srivastava and Prasad, 2000) อย่างไรก็ตาม กรมธุรกิจพลังงาน ประเทศไทย ได้กำหนดมาตรฐานดีเซลเฉพาะความหนืดจลศาสตร์ และความหนาแน่น แต่ไม่กำหนดความหนืดพลวัต (ตารางที่ 1.1) ซึ่งการหาค่าความหนืดพลวัต ต้องใช้ความหนืดจลศาสตร์ ร่วมกับความหนาแน่น ดังสมการที่ 2.1

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.1)$$

กำหนดให้

v คือ ความหนืดจลศาสตร์ (m^2/s)

μ คือ ความหนืดพลวัต ($kg/m.s$)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

ตารางที่ 2.3 ระบบหน่วยความหนืด

ระบบหน่วย	หน่วยความหนืด	
	ความหนืดจลศาสตร์	ความหนืดพลวัต
หน่วย SI	m^2/s	$N.s/m^2, Pa.s$
หน่วย U.S.	ft^2/s	$lb-s/ft^2, slug/ft-s$
หน่วย CGS	cSt	cP

สำหรับงานวิจัยนี้ สนใจศึกษา การสร้างสมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ซึ่งเป็นของไหลประเภทนิวโทเนียน ตัวอย่างสมการทำนายความหนืดจลศาสตร์

1. การสร้างสมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ของน้ำมันพืช 6 ชนิด (ปาล์ม เศษปาล์ม ฝ้าย ถั่วลิสง มะพร้าวแห้ง และเมล็ดทานตะวัน) ผสมในดีเซล ที่สัดส่วน 0-100 vol.% ในช่วงอุณหภูมิ 293-343 K มีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนหนึ่ง พล็อตกราฟสัดส่วนการผสมน้ำมันพืชในดีเซลกับความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิเดียวกัน ได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ จะได้สมการเส้นตรงที่มีสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ 2 ค่า ทำซ้ำขั้นตอนที่หนึ่งทุกช่วงอุณหภูมิ เพื่อหาสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ทั้งหมด ขั้นตอนที่สอง นำสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ทั้งหมดพล็อตกราฟกับอุณหภูมิ ได้สมการเส้นตรงที่มีสัมประสิทธิ์ค่าคงที่

เฉพาะ (ของน้ำมันพืช 6 ชนิด ผสมในดีเซล ที่สัดส่วนการผสมต่างๆ ทุกช่วงอุณหภูมิ) ขั้นตอน ที่สาม นำสัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะแทนลงในสมการลอการิทึมธรรมชาติ ได้สมการทำนาย ความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ (Abolle et al., 2009)

2. สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม ของเมทิลเอสเตอร์ จากน้ำมันพืช 6 ชนิด (เมล็ดทานตะวัน คาโนลา ถั่วเหลือง เมล็ดฝ้าย ข้าวโพด และของเสีย จากน้ำมันปาล์ม) ผสมในดีเซล ที่สัดส่วนต่างๆ มีรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 2.2 (Alptekin and Canakci, 2008, 2009)

$$v = Ax^2 + Bx + C \quad (2.2)$$

กำหนดให้

- v คือ ความหนืดจลศาสตร์ (mm^2/s)
- x คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงในดีเซล (vol.%)
- A, B และ C คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

3. สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ ที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ ของเมทิลเอสเตอร์จากน้ำมัน ปาล์มผสมในดีเซลที่สัดส่วนต่างๆ มีรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 2.3 (Benjumea et al., 2008)

$$v = e^{A - \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2}} \quad (2.3)$$

กำหนดให้

- v คือ ความหนืดจลศาสตร์ (mm^2/s)
- T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
- A, B และ C คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

ความหนาแน่น เป็นคุณสมบัติเคมีกายภาพอย่างหนึ่งของเชื้อเพลิง หรือ อัตราส่วนมวลต่อ ปริมาตรของเชื้อเพลิง ความหนาแน่น สามารถใช้ทำนายความหนืดพลวัต ค่าซีเทน (Ladommatos and Goacher, 1995) และค่าความร้อน (Demirbas, 2000) นอกจากนี้ ความหนาแน่นเป็นคุณสมบัติ ที่สำคัญสำหรับการออกแบบหัวฉีดของเครื่องยนต์ (Ejim et al., 2007) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยทั่วไปอุณหภูมิห้องเผาไหม้หรือที่หัวฉีดไม่คงที่ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามภาระโหลด และ ความเร็วรอบ เมื่ออุณหภูมิหัวฉีดไม่คงที่ ส่งผลให้การฉีดเชื้อเพลิงแต่ละครั้งได้มวลไม่เท่ากัน เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงของหัวฉีดเป็นการฉีดเชื้อเพลิงโดยปริมาตร การฉีดเชื้อเพลิงที่มวล

ไม่เท่ากันส่งผลต่อ กำลัง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค ของเครื่องยนต์ (Alptekin and Canakci, 2009)

ตัวอย่างสมการทำนายความหนาแน่น

1. สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม ของเมทิลเอสเทอร์ จากน้ำมันพืช 6 ชนิด ได้แก่ เมล็ดทานตะวัน คาโนลา ถั่วเหลือง เมล็ดฝ้าย ข้าวโพด และของเสียจากน้ำมันปาล์ม ผสมในดีเซล มีรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 2.4 (Alptekin and Canakci; 2008, 2009)

$$\rho = Ax + B \quad (2.4)$$

กำหนดให้

ρ คือ ความหนาแน่น (g/cm^3)

x คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงในดีเซล (vol.%)

A และ B คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

2. สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ ของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม ผสมในดีเซล มีรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 2.5 (Benjumea et al., 2008)

$$\rho = A(T) + B \quad (2.5)$$

กำหนดให้

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

A และ B คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

การไม่เป็นไข เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้งานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ถ้าเชื้อเพลิงบางส่วนหรือทั้งหมดเป็นไข จะก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันในระบบจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้การจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำได้ยากหรือไม่ได้เลย เครื่องยนต์จึงเดินสะดุดหรือไม่สามารถใช้งานได้ หลายงานวิจัย พบว่า ปัญหาหลักอย่างหนึ่งของการนำน้ำมันพืชใช้โดยตรง หรือผสมในดีเซลก่อนใช้ในเครื่องยนต์ คือ เชื้อเพลิงบางส่วนเป็นไข วิธีที่นิยมแก้ปัญหานี้ คือ การติดตั้งระบบอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงในถังเก็บหรือท่อส่งน้ำมันด้วยฮีตเตอร์หรือไอเสีย (คณิต และเทิดศักดิ์, 2547; สวิทชาติ, 2547; Almeida et al., 2002; Bari et al., 2002; Kalam and Masjuki, 2004) อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนดีเซล

ในเครื่องยนต์ปกติโดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสังเกตคุณลักษณะการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ถูกลผลิต

จากการทบทวนเอกสารคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และการเป็นไข พบว่า มีการสร้างสมการทำนายความหนืด และความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มบางชนิด แต่ยังไม่มีการสร้างสมการทำนายความหนืด และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมดีเซล โดยเฉพาะ นอกจากนี้ยังไม่มีผลการศึกษาค่าการเป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทดสอบ และสร้างสมการทำนายความหนืด ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ซึ่งจะกล่าวในบทที่ถัดไป

2.6 การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ เป็นการยืนยันผลการใช้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ช่วยสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้ใช้ ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันปาล์มหลายชนิด และน้ำมันพืชลดขางเหนียว

1. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลระยะสั้น ในประเทศมาเลเซีย โดยใช้น้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์มผสมดีเซล และดีเซล เป็นเชื้อเพลิง ผลการทดสอบ พบว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วยเชื้อเพลิงทั้งหมดมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน และไม่พบลักษณะการเผาไหม้ที่ไม่พึงประสงค์ แต่การใช้น้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มผสมดีเซลในเครื่องยนต์มีกากถ่านหรือกากคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้มากกว่าการใช้ดีเซลในเครื่องยนต์ นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในเครื่องยนต์มีการปนเปื้อนสูงกว่าการใช้ดีเซลในเครื่องยนต์ (Sapaun et al., 1996)

2. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์สี่สูบ ระบบหัวฉีดอินไดเรคอินเจคชั่น ด้วยน้ำมันปาล์มดิบผสมดีเซล และดีเซล ผลการทดสอบ พบว่า น้ำมันปาล์มดิบผสมดีเซลมีประสิทธิภาพน้อยกว่าดีเซล ในสภาวะการทำงานต่างๆ แต่ที่ความเร็วรอบสูงน้ำมันปาล์มดิบผสมดีเซลมีสมรรถนะเทียบเท่าดีเซล (EI-Awad et al., 2004)

3. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลรถบรรทุกขนาดกลาง ยี่ห้ออิซูซุ รุ่น JB-1 โดยใช้น้ำมันปาล์มดิบอุ่นร้อนที่อุณหภูมิ 50°C และดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ผลการทดสอบ พบว่า ที่ความเร็วรอบ 800-2,200 rpm เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบมีกำลังและแรงบิดต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล แต่ที่ความเร็วรอบ 2,200-3,600 rpm เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบมีกำลังและแรงบิดสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล โดยอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบมีค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล 12.24-13.93% เมื่อทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ระยะยาวเป็นเวลา

270 ชั่วโมง ปรากฏว่า การสะสมของกากคาร์บอนตามชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มดิบมีปริมาณสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล (นพพร, 2546)

4. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์สี่สูบ ระบบหัวฉีดอินไดเรคอินเจกชัน พบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมคือ น้ำมันปาล์มดิบอุ่นที่อุณหภูมิ 60°C ผสมด้วยดีเซล 90 vol.% ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ เมื่อเดินเครื่องเต็มกำลัง ที่ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง พบว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันผสมให้แรงบิดสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซลเล็กน้อย และมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซลตลอดการทำงาน เมื่อเดินเครื่องยนต์ที่ภาระโหลดเปลี่ยนแปลง การเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันผสมมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซลสูงสุดที่ 5% ขณะที่อุณหภูมิไอเสียใกล้เคียงกัน (คณิต และเทิดศักดิ์, 2547)

5. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์สี่สูบเดี่ยว ระบบหัวฉีดอินไดเรคอินเจกชัน จำนวน 3 เครื่อง แต่ละเครื่องใช้น้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด เมทิลเอสเตอร์จากน้ำมันปาล์ม และดีเซล ตามลำดับ โดยเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด ถูกดัดแปลงเครื่องยนต์เล็กน้อย ด้วยการติดตั้งระบบอุ่นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 120°C สำหรับการเดินเครื่องยนต์ทั้งหมด เครื่องยนต์ทั้งหมดถูกจำลองการทำงานที่ภาระโหลด 75% ของภาระโหลดสูงสุด ที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm เมื่ออายุการใช้งานเครื่องยนต์ทั้งหมดครบ 50 ชม. (ช่วงรันอิน) และอายุการใช้งานเครื่องยนต์ทั้งหมดครบทุกๆ 500 ชม. เครื่องยนต์ทั้งหมดถูกทดสอบสมรรถนะ และวิเคราะห์การสึกหรอ ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเตอร์ มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล 67.2-95.2 และ 16.7-20.1% ตามลำดับ มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล 9.9-12.4 และ 0.6-1.3% ตามลำดับ และมีปริมาณควันดำในไอเสียน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล 0-9.3 และ 0-7.7% ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์การสึกหรอ เครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเตอร์ มีค่าการสึกหรอสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซล โดยเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเตอร์ มีอายุการใช้งานประมาณ 1,200 และ 3,000 ชม. ตามลำดับ ส่วนเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซลมีอายุการใช้งานมากกว่า 6,000 ชม. (สวิตชาติ, 2547)

6. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรระยะยาว (1,500 ชม.) ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT80 เครื่องยนต์สี่สูบเดี่ยวแวนอน ชนิดห้องเผาไหม้ลว่งหน้าหมุนวน ระบบหัวฉีดอินไดเรคอินเจกชัน จำนวน 4 เครื่อง เครื่องยนต์ทั้งหมดถูกทดสอบสมรรถนะเมื่อเครื่องยนต์ผ่านการเดินเครื่องเป็นเวลา 0 500 1,000 และ 1,500 ชม. ตามลำดับ นอกจากนี้เครื่องยนต์ทั้งหมด

ถูกวิเคราะห์การสึกหรอเมื่อเครื่องยนต์ผ่านการเดินเครื่อง 1,500 ชม. โดยชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ถูกตรวจสอบ ประกอบด้วย ปัมเชื้อเพลิง วาล์วเชื้อเพลิง ลิ้นไอดี ลิ้นไอเสีย แหวนลูกสูบทั้งหมด และแบร็งก์้านสูบ สำหรับเครื่องยนต์ 3 เครื่องแรก ใช้เชื้อเพลิงผสมที่ได้จากน้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซลที่สัดส่วน 20 30 และ 40 vol.% ตามลำดับ ส่วนเครื่องยนต์ที่สี่ใช้ดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ พบว่า เครื่องยนต์ 3 เครื่องแรก มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 3.9 6.6 และ 10.2% ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 0.8 1.4 และ 3.3% ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเดินเครื่องเพิ่มขึ้น สำหรับการสึกหรอของเครื่องยนต์ การเดินเครื่องยนต์ทั้งหมดที่ 1,500 ชม. ยังไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ด้วยดีเซล เพราะฉะนั้น การเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงผสมดังกล่าว ดีกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรดเพียงอย่างเดียว (น้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด 100%) ที่มีรายงานวิจัยว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานเพียง 1,200 ชม. ในขณะที่เครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลมีอายุการใช้งานมากกว่า 6,000 ชม. (ก่าพล และ ชีระยุทธ, 2551)

7. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลยานพาหนะ ยี่ห้อโตโยต้า รุ่น 2L-Turbo มีสองปรับสภาพใหม่ เครื่องยนต์สี่สูบ ระบบหัวฉีดอินไดเรคอินเจคชั่น โดยใช้ดีเซล และน้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซลที่สัดส่วน 20 30 และ 40 vol.% เป็นเชื้อเพลิงทดสอบ ผลการทดสอบ พบว่า การเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซลที่ 20 30 และ 40 vol.% มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล 3.9 6.8 และ 14.2% ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล 4.6 4.7 และ 10.6% ตามลำดับ (ชีระยุทธ และคณะ, 2551)

8. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลยานพาหนะ ยี่ห้อโตโยต้า รุ่น 2L-Turbo เครื่องยนต์สี่สูบ ระบบหัวฉีดอินไดเรคอินเจคชั่น ระบบอัดอากาศเทอร์โบชาร์จเจอร์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด และความเร็วรอบ พบว่า การผสมน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดในดีเซลสูงถึง 40 vol.% ได้รับผลเป็นที่น่าพอใจ โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงกว่าดีเซล 4.3 ถึง 7.6% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าดีเซล 3.0 ถึง 5.2% และอุณหภูมิไอเสียต่ำกว่าดีเซล 2.7 ถึง 3.4% (Leevijit and Prateepchaikul, 2011)

9. การทดสอบสมรรถนะและการวิเคราะห์การสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น ET80 เครื่องยนต์สูบเดียว ระบบหัวฉีดอินไดเรคอินเจคชั่น จำนวน 2 เครื่อง เครื่องแรก

เดินด้วยน้ำมันปาล์มกลั่น เครื่องที่สองเดินด้วยดีเซล โดยเครื่องยนต์ทั้งหมดถูกเดินที่ภาระโหลด 75% ของภาระโหลดสูงสุด ที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm เป็นเวลา 2,000 ชม. สำหรับการเดินเครื่องยนต์ 1,000 ชม. แรก ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ สรุปได้ว่า อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะของเครื่องยนต์ที่เดินด้วยน้ำมันปาล์มกลั่นสูงกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซล 15-20% ความแตกต่างปริมาณควันดำในไอเสียของเครื่องยนต์ทั้งสองไม่มีนัยสำคัญ เมื่อวิเคราะห์การสึกหรอของเครื่องยนต์ พบว่า แหวนอัดของลูกสูบของเครื่องยนต์ที่เดินด้วยน้ำมันปาล์มกลั่นมีการสึกหรอสูงกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซล ส่วนปั๊มน้ำมัน วาล์วน้ำมัน และวาล์วไอดี มีความแตกต่างที่ไม่ชัดเจน (Prateepchaikul and Apichato, 2003)

10. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล ยี่ห้อฮันมาร์ เครื่องยนต์สูบลิว ชนิดห้องเผาไหม้ หมุนวน ระบบหัวฉีดไดเรคอินเจคชั่น เพื่อเปรียบเทียบการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ เมื่อเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มดิบอุ่นที่อุณหภูมิ 70°C อิมัลชันที่ได้จากน้ำมันปาล์มดิบผสมในน้ำที่สัดส่วน 97 98 และ 99% และอิมัลชันทั้งหมดอุ่นที่อุณหภูมิ 65°C ผลการทดสอบ พบว่า การเดินเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันปาล์มดิบอุ่นที่อุณหภูมิ 70°C มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงชนิดอื่นทั้งหมด แต่มีการปล่อยก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงชนิดอื่นทั้งหมด สาเหตุดังกล่าวคาดว่า การอุ่นน้ำมันปาล์มดิบก่อนใช้งาน ช่วยลดความหนืดเชื้อเพลิง และเพิ่มปริมาณการระเหยเชื้อเพลิง ทำให้หัวฉีดฉีดเชื้อเพลิงกระจายตัวได้ดีขึ้น (Kalam and Masjuki, 2004)

11. การศึกษาทฤษฎีและการทดลอง พบว่า การอุ่นเมทิลเอสเทอร์จากปาล์มสูงกว่าอุณหภูมิปกติก่อนการใช้งาน สมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Masjuki et al., 1996)

12. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์การเกษตร ด้วยน้ำมันพืชลดยางเหนียว 3 ชนิด ได้แก่ Karanja Putranjiva และสบู่ดำ ผสมในดีเซลที่สัดส่วน 10 20 30 และ 40 vol.% พบว่า การผสมน้ำมันพืชลดยางเหนียวทุกชนิดในดีเซล 20 vol.% ให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจมาก สมรรถนะเครื่องยนต์ดี ปริมาณไอเสียลดลง ซึ่งการลดยางเหนียวในน้ำมันพืช เป็นการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการเคมีที่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความหนืดและค่าซีเทนให้ดีขึ้น (Haldara et al., 2009)

จากการทบทวนเอกสารการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลประเภทต่างๆ ด้วยเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันปาล์มลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มกลั่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด เมทิลเอสเทอร์

และน้ำมันพืชลดยางเหนียว สรุปได้ว่า การนำเชื้อเพลิงแต่ละชนิดผสมในดีเซลที่สัดส่วนการผสมต่างๆ เชื้อเพลิงผสมบางชนิดเมื่อใช้ทดสอบเครื่องยนต์ดีเซล ให้ผลการทดสอบที่น่าพึงพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ดีเซลในเครื่องยนต์ เนื่องจากการนำเชื้อเพลิงผสมในดีเซล ช่วยลดความหนืดของเชื้อเพลิง และยังปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านอื่นๆ ตัวอย่างเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจ ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล 40 vol.% น้ำมันพืชลดยางเหนียวผสมในดีเซล 20 vol.% นอกจากนี้ การอุ่นเชื้อเพลิงเริ่มต้นก่อนการใช้งาน เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ สามารถลดความหนืด และปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านอื่นๆ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้จะทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ โดยไม่อุ่นเชื้อเพลิงเริ่มต้นก่อนใช้งาน ซึ่งง่ายและสะดวกสำหรับผู้ใช้เครื่องยนต์ทั่วไป ที่ไม่มีความประสงค์จะดัดแปลงเครื่องยนต์ (ติดตั้งระบบอุ่นเชื้อเพลิงในถังน้ำมัน) ที่มีอยู่เดิม โดยงานวิจัยนี้จะแก้ปัญหาคุณสมบัติเชื้อเพลิงเริ่มต้นด้วยการผสมเชื้อเพลิงในดีเซล โดยเลือกสัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงในดีเซลสูงสุด ที่ผ่านการวิเคราะห์การผลิต ต้นทุน องค์ประกอบเชื้อเพลิง คุณลักษณะการเป็นของเหลว ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และการเป็นไข ซึ่งผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์จะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

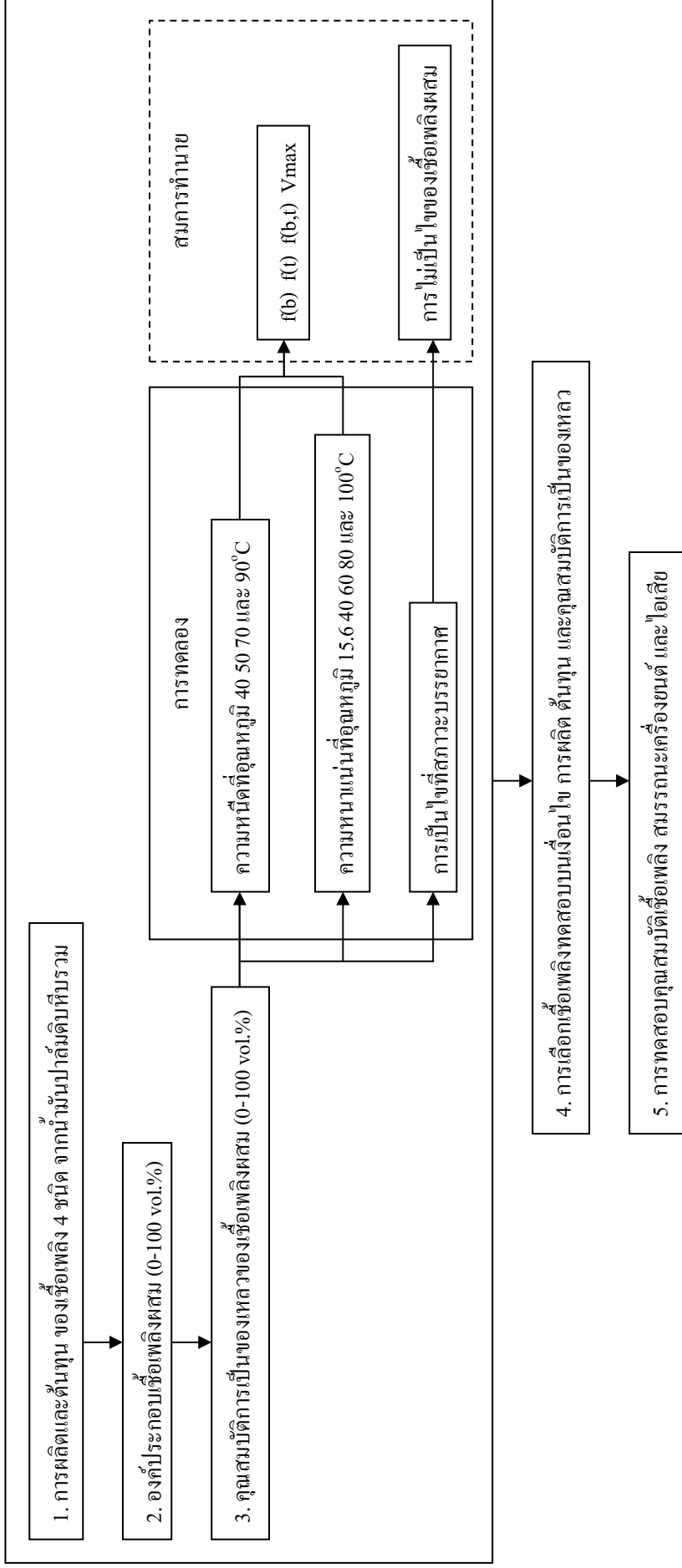
สำหรับบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการวิจัย ซึ่งมีเนื้อหาประกอบด้วย การผลิตและต้นทุน ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม องค์ประกอบเชื้อเพลิง คุณสมบัติการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงผสม 3 ประเภท ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข การเลือกเชื้อเพลิงทดสอบบนเครื่องยนต์ การผลิต ต้นทุน และคุณสมบัติการเป็นของเหลว นอกจากนี้ ยังกล่าวถึง การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง สมรรถนะเครื่องยนต์ และไอเสีย ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1

3.1 การผลิตและต้นทุน ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

สำหรับงานวิจัยนี้ วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ประกอบด้วย น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ซึ่งจากห้างหุ้นส่วนจำกัดรุ่งเรืองกิจน้ำมันพืช ตำบลพะตง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา มีกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 10-12 wt.% และสารเคมีเกรดการค้า ได้แก่ กรดฟอสฟอริก (ความบริสุทธิ์ 85 wt.%) กรดซัลฟิวริก (ความบริสุทธิ์ 98 wt.%) เมทานอล (ความบริสุทธิ์ 98 wt.%) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 99 wt.%)

เชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ประกอบด้วย น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ ถูกผลิตแบบกะ ครั้งละ 1 ลิตร ด้วยอุปกรณ์กวนทำปฏิกิริยาอย่างง่ายระดับห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ ได้แก่ ชุดมอเตอร์พร้อมใบกวน แทนให้ความร้อน (ฮีตเตอร์) และถังปฏิกรณ์ (บีกเกอร์ปิดด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์)

การทดลองเปรียบเทียบกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม สำหรับการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ เป็นการนำน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมทำปฏิกิริยาขั้นตอนเดียว ขั้นตอนการผลิต ดังนี้ ขั้นตอนที่หนึ่ง นำสารตั้งต้นน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม 1 ลิตร ทำปฏิกิริยากับ ตัวทำปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา (อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ไฟน์ไม่ควรเกินจุดเดือดเมทานอล ที่อุณหภูมิ 64.7°C) ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งเชื้อเพลิงที่ผลิตถูกกวนผสม 90 นาที ที่ความเร็วรอบ 250-350 rpm ขั้นตอนที่สอง ปล่อยให้เชื้อเพลิงที่ผลิตมีอุณหภูมิลดลง และเกิดการแยกชั้นเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นแยกส่วนของเสียที่อยู่ชั้นล่างออกจากเชื้อเพลิง และนำเชื้อเพลิงที่ผลิตกรองด้วยตะแกรงละเอียด ขั้นตอนที่สาม นำเชื้อเพลิงที่ผลิตล้างน้ำ และอุ่นไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 100-110°C จนกระทั่งน้ำ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย



รูปที่ 3.2 ชุดการผลิต

ออกจากเชื้อเพลิงเกือบหมด (ขั้นตอนนี้สังเกตได้จากปริมาณฟองน้ำหรือน้ำเดือด ถ้าปริมาณฟองน้ำในเชื้อเพลิงหายไปหรือไม่มีการบับเบิลไอน้ำของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกเล็กน้อย ประมาณ 120°C การอุ่นไอน้ำเป็นอันเสร็จสิ้น โดยรวม การอุ่นไอน้ำประมาณ 30 นาที) ส่วนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเทอร์ เป็นการนำน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนการผลิตทั้งหมดมีลักษณะคล้ายกับ การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์รีไฟน์ ดังตารางที่ 3.1 แต่การทำปฏิกิริยาขั้นตอนแรก ไม่ต้องนำเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ล้างน้ำ สามารถนำเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ทำปฏิกิริยาต่อเนื่องในขั้นตอนที่สองได้ทันที

ในส่วนการล้างเชื้อเพลิงด้วยน้ำ สำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์รีไฟน์ มีขั้นตอนดังนี้ สเปรย์น้ำ 1 ลิตร (ให้ละเอียดที่สุด) ผ่านเชื้อเพลิง พร้อมทั้งกวนเชื้อเพลิงเล็กน้อย จากนั้นถ่ายน้ำออกจากเชื้อเพลิง ทำเช่นนี้เป็นจำนวน 5 ครั้ง (ใช้น้ำทั้งหมด 5 ลิตร) ส่วนการล้างเมทิลเอสเทอร์ ขั้นตอนแรก สเปรย์น้ำผ่านเชื้อเพลิง และถ่ายน้ำทิ้ง เป็นจำนวน 2 ครั้ง แต่แต่ละครั้งใช้น้ำ 50 vol.% ของเชื้อเพลิง ขั้นตอนที่สอง สเปรย์น้ำ 50 vol.% ของเชื้อเพลิง พร้อมทั้งเปิดปั๊มลมบับเบิลอากาศผ่านน้ำและเชื้อเพลิง (กวนผสมกับน้ำกับเชื้อเพลิง) 5 นาที จากนั้นปล่อยให้ น้ำแยกออกจากเชื้อเพลิง และถ่ายน้ำทิ้ง ขั้นตอนที่สองทำซ้ำเรื่อยๆ จนกระทั่งเชื้อเพลิงมีสีใส และสะอาด (ใช้น้ำล้างทั้งหมดประมาณ 5 ลิตร)

ตารางที่ 3.1 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

ขั้นตอนการผลิต	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียว	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียวและลดกรด	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เอสเตอรีไฟน์	เมทิลเอสเตอรจาก น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม
1. กวนทำปฏิกิริยา				
นาน 90 นาที				
- สารตั้งต้น	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียว	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เอสเตอรีไฟน์
- ตัวทำปฏิกิริยา	กรดฟอสฟอริก (0.25 vol.% ของน้ำมัน ปาล์มดิบหีบรวม)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (16.9+1 = 17.9 g of NaOH/L ของน้ำมันปาล์ม ดิบหีบรวมลดยางเหนียว)	เมทานอล (20 vol.% ของน้ำมัน ปาล์มดิบหีบรวม)	เมทานอล (23 vol.% ของน้ำมันปาล์ม ดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์)
- ตัวทำละลาย	น้ำ (2.25 vol.% ของน้ำมัน ปาล์มดิบหีบรวม)	น้ำ (10 vol.% ของน้ำมันปาล์ม ดิบหีบรวมลดยางเหนียว)	-	-
- ตัวเร่งปฏิกิริยา	-	-	กรดซัลฟิวริก (2 vol.% ของน้ำมันปาล์ม ดิบหีบรวม)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.9 + 5 = 5.9 g of NaOH/L ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เอสเตอรีไฟน์)
- อุณหภูมิ (°C)	80	80	60	60
2. ปล่อยให้เย็นตัวและแยกชั้น				
เป็นเวลา 120 นาที				
- ชั้นบน	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียว	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียวและลดกรด	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เอสเตอรีไฟน์	เมทิลเอสเตอร
- ชั้นล่าง	สารละลายกับยางเหนียว	น้ำสนุ่	กลีเซอรอลและยางเหนียว	กลีเซอรอล
3. กรองด้วยตะแกรงละเอียด				
4. นำไปล้างน้ำ				
5. อุ่นไล่ไอน้ำที่ 100 °C				

3.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิง

3.2.1 องค์ประกอบ

เพื่อบ่งบอกองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม จึงนำตัวอย่างเชื้อเพลิงทั้งหมดวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธี Thin Layer Chromatography / Flame Ionization Detector (TLC/FID) โดยใช้อุปกรณ์ Itronscan รุ่น MK-6s และหลอดแก้วชนิด S-III quartz rod ยี่ห้อ Mitshubishi Kagaku Iatron ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รายละเอียดขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้ นำตัวอย่างเชื้อเพลิง 1 µl ละลายในเฮกเซน 0.75 ml จากนั้นหยดสารละลายลงบนหลอดแก้ว นำหลอดแก้วแช่ในสารละลาย Hexane:Diethyl Ether:Formic Acid ที่มีสัดส่วนผสม 50:20:0.3 vol.% จนสารละลายเคลื่อนที่บนหลอดแก้วเป็นระยะทาง 8 cm นำหลอดแก้วไปแช่ในสารละลาย Hexane:Benzene ที่มีสัดส่วนผสม 1:1 vol.% จนสารละลายเคลื่อนที่บนหลอดแก้วเป็นระยะทาง 10 cm นำหลอดแก้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C และนำไปเผาวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ Itronscan ที่อัตราการไหลก๊าซไฮโดรเจนและ

อากาศ 0.16 และ 2 L/min ความเร็วในการสแกน 30 sec จะได้ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของตัวอย่างเชื้อเพลิง

3.2.2 ชนิดกรดไขมัน

ชนิดกรดไขมันของน้ำมันพืชหรือเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืช ปกติสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี Gas Chromatography / Flame Ionize Detector (GC/FID) ซึ่งตัวอย่างเชื้อเพลิงที่นำมาวิเคราะห์จำเป็นต้องถูกเตรียมให้อยู่ในรูปเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ด้วยชนิดจำกัดดังกล่าว เมื่อวิเคราะห์ชนิดกรดไขมันของ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ก็จะได้ค่าที่เหมือนกันสำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด ในขั้นตอนการผลิต มีการสูญเสียน้ำมันไปเกือบครึ่งของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเริ่มต้น (ปริมาณการได้คืน 53.90 % vol. basis) การสูญเสียดังกล่าวอาจส่งผลให้ชนิดกรดไขมันมีความแตกต่างออกไป อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการพิสูจน์ งานวิจัยนี้จึงส่งตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด วิเคราะห์หาชนิดกรดไขมันด้วยวิธี GC/FID ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.3 คุณสมบัติการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงผสม

3.3.1 ความหนืดจลศาสตร์

นำเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม มีขั้นตอนการผลิตดังตารางที่ 3.1 ผสมในดีเซลที่สัดส่วน 0 20 40 60 80 และ 100 vol.% ตามลำดับ ด้วยกระบอกตวง 100 ml ความละเอียด ± 0.5 ml ที่อุณหภูมิห้อง เชื้อเพลิงผสมทั้งหมดถูกทดสอบความหนืดจลศาสตร์ตามมาตรฐาน ASTM D445 ที่อุณหภูมิ 40°C และถูกทดสอบความหนืดจลศาสตร์เพิ่มเติมที่อุณหภูมิ 50 70 และ 90°C ตามลำดับ เป็นจำนวน 3 ชั่วโมงเพื่อรายงานค่าเฉลี่ย ด้วยอุปกรณ์วัดความหนืด ยี่ห้อ Cannon รุ่น Fenske Routine Type for Transparent Liquids (Manning et al.) และอ่างควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ JLabo รุ่น MD-160 ซึ่งการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3.3.2 ความหนาแน่น

นำเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากตารางที่ 3.1 ผสมในดีเซลที่สัดส่วน 0 20 40 60 80 และ 100 vol.% ตามลำดับ ด้วยกระบอกตวง 100 ml ความละเอียด ± 0.5 ml ที่อุณหภูมิห้อง เชื้อเพลิงผสมทั้งหมดถูก

ทดสอบความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15.6 40 60 80 และ 100°C ตามลำดับ ด้วยอุปกรณ์ Picanometer 25 ml และเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ LIBROR รุ่น EBQ-3200H ความละเอียด 0.01 g ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงถูกคำนวณจากน้ำหนักเชื้อเพลิงหารด้วยปริมาตรเชื้อเพลิงที่บรรจุใน Picanometer การทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดถูกทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อรายงานค่าเฉลี่ย

3.3.3 คุณลักษณะการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสม

การทดสอบการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เมื่อผสมในสัดส่วนที่สัดส่วน 0 10 20 30 40 60 80 และ 100 vol.% ตามลำดับ เชื้อเพลิงผสมทั้งหมดถูกบรรจุในกระบอกตวงขนาด 100 ml (อ่านค่าละเอียด 1 ml) ปิดปากกระบอกตวงด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันฝุ่นละออง ความชื้น และสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดวางในบรรยากาศปกติที่ห้องทดลองภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งมีอุณหภูมิรอบวันเฉลี่ยประมาณ 22-34°C (คอหงษ์ สกษ., 2555) สังเกตและอ่านค่าปริมาณไขที่เกิดขึ้นทุกวัน

3.3.4 การสมการคณิตศาสตร์ทำนายความหนืดจลศาสตร์และความหนาแน่น และการตรวจสอบความแม่นยำของสมการ

การสร้างสมการทำนายความหนืดจลศาสตร์และความหนาแน่น ใช้วิธีระเบียบวิธีการถดถอยแบบน้อยสุด (least squares regression) สำหรับการถอดค่าคงที่ของสมการ โดยสมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ ใช้วิธีการถดถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential regression) ส่วนสมการทำนายความหนาแน่น ใช้วิธีการถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression)

สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำของสมการ นำสมการทำนายความหนืดจลศาสตร์และความหนาแน่นทั้งหมด ตรวจสอบความแม่นยำด้วยค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Mean Relative Deviation: MRD) ดังสมการที่ 3.1 ซึ่งค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ย คือ ค่าเปรียบเทียบผลการทำซ้ำโดยตรงระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายของข้อมูล

$$MRD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{exp} - x_{sim}|}{x_{exp}} \quad (3.1)$$

กำหนดให้

- MRD คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
 n คือ จำนวนเชื้อเพลิงทดสอบ
 x_{exp} คือ ผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง
 x_{sim} คือ ผลการทำนายคุณสมบัติเชื้อเพลิง

นอกจากนี้ ยังใช้ค่า Coefficient of Determination หรือ R-squared (R^2) ดังสมการที่ 3.2 ตรวจสอบความแม่นยำของสมการอีกด้วย สำหรับค่า R^2 คือ ค่าบ่งชี้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความใกล้เคียงของค่าประมาณสำหรับเส้นแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าข้อมูลจริง เส้นแนวโน้มจะน่าเชื่อถือมากที่สุดเมื่อค่า R^2 เข้าใกล้ 1 ในทางสถิติวิศวกรรมยอมรับค่า R^2 ไม่น้อยกว่า 0.95

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (3.2)$$

กำหนดให้

- R^2 คือ R-squared
 SS_R คือ The regression sum of squares
 SS_T คือ The sum of squares

โดยที่

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.3)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.4)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3.5)$$

กำหนดให้

- \hat{y} คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย
 y_i คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบ
 n คือ จำนวนข้อมูล
 SS_R คือ The regression sum of squares
 SS_T คือ The sum of squares

3.3.5 การสร้างสมการคณิตศาสตร์ทำนายการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสม

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากผลการทดสอบการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสม เพื่อใช้สร้างเงื่อนไขเฉพาะที่บ่งบอกการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ซึ่งข้อสรุปทั้งหมดจะมีประโยชน์สำหรับการวิจัยและพัฒนาส่วนผสมดีเซลต้นทุนต่ำจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมต่อไป

การสร้างสมการทำนายการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสม ใช้วิธีเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไขสูงสุดกับตัวแปรชนิดต่างๆ ของเชื้อเพลิงผสม และใช้วิธีเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ตัวคูณของตัวแปรแต่ละชนิด (วิธีการเปลี่ยนตัวแปร) เพื่อให้กราฟแสดงการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสม และจุดเริ่มเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทับกันสนิท (Graphic Method)

3.4 การเลือกเชื้อเพลิงทดสอบ

การเลือกเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจ สำหรับนำไปใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรปกติที่ไม่ได้ดัดแปลงเครื่องยนต์ อาศัยผลการศึกษา การผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและต้นทุนองค์ประกอบเชื้อเพลิง และผลการศึกษาคูณลักษณะการเป็นของเหลวที่สำคัญ 3 ประเภท ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิงผสม เป็นเงื่อนไขพิจารณา

3.5 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง สมรรถนะเครื่องยนต์ และการปลดปล่อยไอเสีย

3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

สำหรับเชื้อเพลิงผสมที่ถูกเลือก และดีเซล ควรทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานให้ครอบคลุมมากที่สุด อย่างไรก็ตามด้วยเงื่อนไขจำกัดของเงินทุนวิจัยที่มียานวิจัยนี้จึงพยายามทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงให้ครอบคลุมคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อประเมินข้อดีข้อด้อยของการเป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล

3.5.2 การทดสอบสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสีย

การทดสอบสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรบนแท่นทดสอบ เมื่อเดินด้วยเชื้อเพลิงผสมที่ถูกเลือกเปรียบเทียบการเดินด้วยดีเซล เพื่อประเมินผลกระทบต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์

3.5.2.1 อุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์การเกษตรระยะสั้นบนแท่นทดสอบ มีอุปกรณ์ทดสอบและรายละเอียดอุปกรณ์ ดังนี้

1) เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT80 เป็นเครื่องยนต์สูบเดียวแวนอนระบบ 4 จังหวะ ชนิดห้องเผาไหม้ลว่งหน้าหมุนวน ขนาดกระบอกสูบ 84 mm. ปริมาตรช่วงชัก 465 mm. อัตราส่วนการอัด 23:1 กำลังสูงสุด 5.9 kW ที่ 2,400 rpm กำลังต่อเนื่อง 5.1 kW ที่ 2,400 rpm แรงบิดสูงสุด 2.8 kg-m ที่ 1,600 rpm ระบายความร้อนด้วยน้ำ หม้อน้ำแบบรังผึ้ง ขับคันท้ำมันหล่อลื่นด้วยปั๊มไทรคอยด์ และมีหม้อกรองอากาศแบบเปียก

2) แท่นทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ขนาด 12 hp ของบริษัท Plint & Partner

3) เครื่องวัดความเร็วรอบดิจิทัลแบบลำแสง ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DT240P พิกัด 0-5,000 rpm

4) นาฬิกาดิจิทัล ยี่ห้อ ALBA ความละเอียด 0.01 วินาที

5) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย ยี่ห้อ Testo รุ่น 350

3.5.2.2 วิธีการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

สำหรับการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์การเกษตรระยะสั้น ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด งานวิจัยนี้เลือกวิธีทดสอบ 2 วิธี ดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm เลือกทดสอบที่ภาระโหลด 1.28 2.55 3.83 5.10 kW และภาระโหลดเต็มที ตามลำดับ ที่ภาระโหลดต่างๆ บันทึกข้อมูล แรงบิด ความเร็วรอบ ระยะเวลาสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงทดสอบโดยปริมาตร อุณหภูมิเชื้อเพลิงทดสอบ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย และองค์ประกอบก๊าซไอเสีย

2) การเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm เลือกทดสอบทุกช่วงความเร็วรอบ 200 rpm การทดสอบนี้บันทึกข้อมูลทั้งหมดเช่นเดียวกับการเปลี่ยนภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm

เมื่อบันทึกข้อมูลทั้งหมดจากการทดสอบ 2 วิธี ข้างต้น นำข้อมูลทั้งหมดคำนวณ กำลังเบรค อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค ดังสมการที่ 3.6-3.10 ตามลำดับ

$$BHP = \frac{WN}{5000} \quad (3.6)$$

$$P = 0.746BHP \quad (3.7)$$

$$\dot{m} = \rho \dot{v} \quad (3.8)$$

$$BSFC = \frac{\dot{m}}{P} \quad (3.9)$$

$$\eta_{bth} = \frac{3,600 \times 100\%}{BSFC \times LHV} \quad (3.10)$$

กำหนดให้

<i>BHP</i>	คือ กำลัง (HP)
<i>W</i>	คือ แรงบิด (lbf.ft)
<i>N</i>	คือ ความเร็วรอบ (rpm)
<i>P</i>	คือ กำลังเบรคของเครื่องยนต์ (kW)
ρ	คือ ความหนาแน่นเชื้อเพลิง (kg/m ³)
\dot{v}	คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยปริมาตร (m ³ /hr)
\dot{m}	คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/hr)
<i>BSFC</i>	คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ (kg/kW-hr)
η_{bth}	คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (%)
<i>LHV</i>	คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์

4.1 การผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและต้นทุน

จากการสังเกตกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม พบว่า เชื้อเพลิงทั้งหมด สามารถผลิตได้ง่าย มีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง จึงไม่มีข้อจำกัดหากจะนำไปผลิตใช้งานจริง (แม้ในชุมชนเกษตรกรรม) อย่างไรก็ตาม การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเทอร์ต้องใช้กระบวนการผลิต 2 ขั้นตอนมากกว่าการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ ที่ใช้กระบวนการผลิตเพียงขั้นตอนเดียว ดังนั้น การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเทอร์ ต้องใช้เวลาการผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า

สำหรับชุมชนห่างไกล เมื่อพิจารณามุมมองการพึ่งพาสารเคมีจากแหล่งภายนอก พบว่า การผลิตเมทิลเอสเทอร์ต้องใช้สารเคมีจากแหล่งภายนอกสูงที่สุด โดยเฉพาะเมทานอล รองลงมาก็คือการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ ส่วนการผลิตเชื้อเพลิงอีก 2 ชนิดที่เหลือ ใช้สารเคมีจากแหล่งภายนอกน้อยมาก โดยเฉพาะการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว ใช้กรดฟอสฟอริกเพียง 0.25 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเท่านั้น

เมื่อพิจารณาปริมาณการได้คีน หรือสัดส่วนปริมาณเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ต่อปริมาณสารตั้งต้น จะเห็นได้ว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ เมทิลเอสเทอร์ และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีปริมาณการได้คีนที่ 98.00 96.00 93.12 และ 53.90 % vol. basis เรียงจากมากไปน้อย ตามลำดับ เมื่อจำแนกขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงพบว่า ขั้นตอนการแยกชั้นและการล้าง มีการสูญเสียเชื้อเพลิงส่วนหนึ่ง สาเหตุดังกล่าว ส่งผลให้ปริมาณการได้คีนของเชื้อเพลิงมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงแต่ละชนิดพบว่า การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ มีการสูญเสียเชื้อเพลิงเล็กน้อยในขั้นตอนการแยกชั้นและการล้าง สำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ มีการสูญเสียเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในขั้นตอนดังกล่าว เนื่องจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชันกับกรดไขมันอิสระ (กรดไขมันอิสระที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน) เปลี่ยนเป็นสบู่ เป็นที่ทราบกันดีว่า สบู่เป็นอิมัลซิไฟเออร์อย่างดีระหว่างน้ำกับไขมัน ดังนั้น การผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ยังมีปริมาณสบู่ที่เกิดขึ้นมากในขั้นตอนการทำปฏิกิริยา การสูญเสียเชื้อเพลิงในขั้นตอนการแยกชั้นและการล้างก็จะเพิ่มขึ้น

ส่วนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีการสูญเสียเชื้อเพลิงมากที่สุด โดยเฉพาะการสูญเสียในขั้นตอนการแยกชั้น สาเหตุเกิดจาก สารตั้งต้น (น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว) ในการทำปฏิกิริยาขั้นตอนที่สองมีกรดไขมันอิสระสูง ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดสบู่เป็นจำนวนมาก โดยสบู่จะจับตัวกับเชื้อเพลิงส่วนอื่นๆ ตกอยู่ในรูปของเสีย การแยกเชื้อเพลิงออกจากสบู่ให้ได้มากที่สุด จำเป็นต้องใช้เวลามาก แต่ในทางกลับกัน การใช้เวลามากเกินไป เชื้อเพลิงส่วนของเหลวจะเปลี่ยนเป็นไข ไขของเชื้อเพลิงจะตกลงด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงและจะทับถมกับชั้นของเสีย ส่งผลให้การแยกเชื้อเพลิงออกจากสบู่ทำได้ยากมากขึ้น

สำหรับต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เมื่อนำปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิต ต้นทุนวัตถุดิบ และปริมาณการได้คืนของเชื้อเพลิง กำหนดด้วยสมการที่ 4.1 จะได้ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.1 สำหรับปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิต ประกอบด้วย สารตั้งต้น (น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม) ตัวทำปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวทำละลาย (ใช้น้ำละลายตัวทำปฏิกิริยาและล้างน้ำมัน) ในตารางที่ 3.1 บวกด้วยปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ผลิต (วิธีการคำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิตแสดงในภาคผนวก ข) ส่วนต้นทุนวัตถุดิบ ใช้น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและสารเคมี ในตารางที่ 2.1 และภาคผนวก ค

$$cf = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot cm_i) \times 100}{y} \quad (4.1)$$

กำหนดให้

- cf คือ ต้นทุนเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 1 ลิตร (บาท/ลิตร)
- cm_i คือ ต้นทุนวัตถุดิบแต่ละชนิด i ที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 1 ลิตร (บาท/หน่วย)
- n คือ จำนวนวัตถุดิบที่ใช้ผลิต
- n_i คือ จำนวนหน่วยวัตถุดิบแต่ละชนิด i ที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 1 ลิตร (หน่วย)
- y คือ ปริมาณการได้คืน หรือสัดส่วนปริมาณเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ต่อปริมาณสารตั้งต้น (% vol. basis)

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ เมทิลเอสเตออร์ และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามลำดับดังนี้ 22.77 28.55 35.69 และ 43.01 บาท/ลิตร เมื่อเปรียบเทียบราคา

ขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มทั่วประเทศเฉลี่ย 28.18 บาท/ลิตร และราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มภาคใต้เฉลี่ย 28.21 บาท/ลิตร (ตารางที่ 2.1) พบว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเทอร์ มีราคาแข่งขันกับดีเซลได้ยาก เนื่องจากมีราคาสูงกว่าดีเซล 14.80-14.83 และ 7.47-7.50 บาท/ลิตร ขณะที่น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีความน่าสนใจในด้านราคา ถึงแม้ว่าน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์มีราคาสูงกว่าดีเซลก็ตาม แต่ก็สูงกว่าดีเซลเพียงเล็กน้อย (0.34-0.37 บาท/ลิตร) อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ยังมีความเป็นไปได้ที่สามารถลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง (หัวข้อ 5.2 ข้อเสนอแนะ) สำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว เป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาน่าสนใจมากที่สุด โดยมีราคาเพิ่มขึ้นจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเพียง 0.91 บาท/ลิตร (4.18% ของราคาน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม)

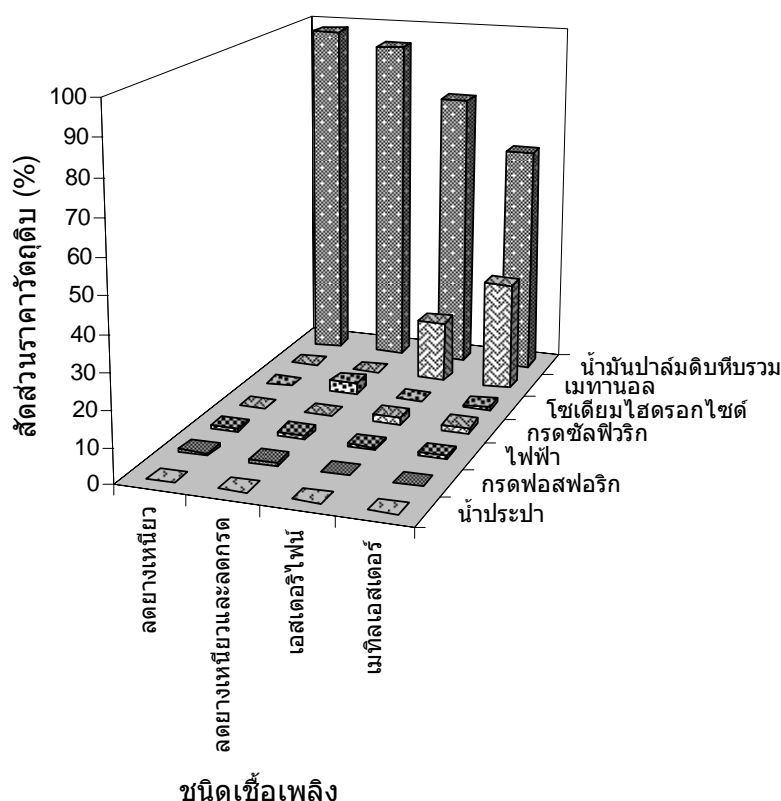
ตารางที่ 4.1 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

วัตถุดิบ (unit)	ต้นทุน/หน่วย (baht)	จำนวนหน่วยที่ใช้ผลิต				ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (baht)			
		ลดยางเหนียว	ลดยางเหนียวและลดกรด	เอสเทอร์ไฟน์	เมทิลเอสเทอร์	ลดยางเหนียว	ลดยางเหนียวและลดกรด	เอสเทอร์ไฟน์	เมทิลเอสเทอร์
น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (L)	21.86	1	1	1	1	21.86	21.86	21.86	21.86
กรดฟอสฟอริก (kg)	51.14	0.0042	0.0042	-	-	0.2158	0.2158	-	-
กรดซัลฟูริก (kg)	15.29	-	-	0.0365	0.0365	-	-	0.5583	0.5583
เมทานอล (kg)	30.31	-	-	0.1577	0.3391	-	-	4.7808	10.2788
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (kg)	38.40	-	0.0187	-	0.0059	-	0.7193	-	0.2276
น้ำประปา (L)	0.013	5.0225	5.1225	5	5	0.0635	0.0647	0.0632	0.0632
ไฟฟ้า (kWh)	2.76	0.0652	0.1179	0.0539	0.876	0.1798	0.3254	0.1487	0.2418
		ต้นทุนรวม (baht)				22.32	23.18	27.41	33.23
		ปริมาณการได้คืน (% vol. basis)				98.00	53.90	96.00	93.12
		ต้นทุนเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล (baht/L)				22.77	43.01	28.55	35.69

- หมายเหตุ 1. ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาร่วมอยู่กับคาร์ดไขมันอิสระที่ไคเตรทได้ของน้ำมันตั้งต้น
2. ต้นทุนในที่นี้ ไม่รวมค่าแรงงานในการผลิต
3. ต้นทุนค่าน้ำประปา (อัตราค่าน้ำธุรกิจขนาดเล็ก; ภาษีค่าไฟฟ้าและน้ำประปา)
4. ต้นทุนค่าไฟฟ้า (อัตราค่าไฟฟ้ากิจการขนาดเล็ก; ค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ Fc; ภาษีค่าไฟฟ้าและน้ำประปา)

เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการหาแนวทางพัฒนาเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลต้นทุนต่ำจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม งานวิจัยนี้จึงคำนวณสัดส่วนต้นทุนวัตถุดิบของการผลิตเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีต้นทุนหลัก 94.28-97.94% เป็นน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม อีก 0.81-1.40% เป็นค่าไฟฟ้า และ 1.25-4.31% เป็นต้นทุนอื่นๆ สำหรับการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ สัดส่วนต้นทุนของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดลงเป็น 79.75%

ขณะที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของสัดส่วนเมทานอล และกรดซัลฟิวริกเป็น 17.44 และ 2.04% ส่วนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ สัดส่วนต้นทุนของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดลงเหลือ 65.78% แต่สัดส่วนต้นทุนของเมทานอลเพิ่มขึ้นเป็น 30.93% ขณะที่สัดส่วนต้นทุนของกรดซัลฟิวริกลดลงอีกเล็กน้อยเป็น 1.68%



รูปที่ 4.1 สัดส่วนราคาวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

4.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิง

4.2.1 องค์ประกอบ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบดังตารางที่ 4.2 พบว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวมีองค์ประกอบใกล้เคียงกันมาก ส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์ (>79 wt.%) และกรดไขมันอิสระ (≈ 12 wt.%) ที่เหลือเป็นไดกลีเซอไรด์ (≈ 8 wt.%) และมีโมโนกลีเซอไรด์อีกเล็กน้อย (≈ 1 wt.%) โดยสรุปจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณลักษณะน้ำมันด้วยกระบวนการลดยางเหนียว เป็นการปรับปรุงความสะอาดของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (wt.%)

เชื้อเพลิง	TG	DG	MG	FFA	ME
ปาล์มดิบหีบรวม	79.5	7.7	0.9	11.9	-
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว	79.3	7.7	1.0	12.0	-
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด	87.7	8.5	1.1	2.7	-
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์	66.2	8.6	1.2	0.8	23.2
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม	0.1	0.1	0.5	0.2	99.1

หมายเหตุ: TG คือ ไตรกลีเซอไรด์; DG คือ ไดกลีเซอไรด์; MG คือ โมโนกลีเซอไรด์; FFA คือ กรดไขมันอิสระ; ME คือ เมทิลเอสเตอร์

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด ซึ่งได้จากการนำน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว ลดกรดด้วยปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (เปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นสบู่) พบว่า สามารถลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันจาก 12 wt.% เหลือเพียง 2.7 wt.% เมื่อเปรียบเทียบกับมวลที่หายไปเกือบครึ่งของกระบวนการผลิต จึงทราบว่า การสูญเสีย $\approx 20\%$ ของการสูญเสียทั้งหมด เกิดจากการเปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นสบู่ และการสูญเสีย $\approx 80\%$ ของการสูญเสียทั้งหมด เกิดจากการสูญเสียเชื้อเพลิงในขั้นตอนการแยกชั้นและการล้าง (การแยกชั้น $\approx 75\%$ การล้าง $\approx 25\%$) จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรดมีกรดไขมันอิสระต่ำกว่า และมีไตรกลีเซอไรด์สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ขณะที่องค์ประกอบโมเลกุลอื่นๆ ใกล้เคียงกัน

สำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม พบว่า ไตรกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์มีค่าใกล้เคียงกัน มีกรดไขมันอิสระและไตรกลีเซอไรด์น้อยกว่าประมาณ 11.1 และ 13.3 wt.% ตามลำดับ แต่มีเมทิลเอสเตอร์มากกว่า 23.2 wt.% โดยรวมจะเห็นได้ว่า ผลรวมของปริมาณกรดไขมันอิสระและไตรกลีเซอไรด์มีค่าลดลง สอดคล้องกับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น สรุปได้ว่า การทำปฏิกิริยาเอสเตอรีฟิเคชันที่ศึกษา องค์ประกอบของกรดไขมันอิสระเกือบทั้งหมดและไตรกลีเซอไรด์บางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเตอร์

ส่วนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ด้วยการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน พบว่า เกือบทั้งหมดของไตรกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ถูกเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเตอร์ โดยเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99 wt.%

จากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงในตารางที่ 4.2 เมื่อนำมาคำนวณร่วมกับผลการวัดความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 30 °C ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม

และดีเซล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 918.6 919.0 902.1 871.8 และ 823.8 kg/□ ตามลำดับ ด้วยสมการที่ 4.2 จะได้สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบในเชื้อเพลิงผสม ดังตารางที่ 4.3 และกราฟรูปที่ 4.3-4.7 ตามลำดับ

$$f_{i,B} = \frac{f_{i,MCPOF} V \rho_{MCPOF}}{V \rho_{MCPOF} + (1-V) \rho_D} \quad (4.2)$$

กำหนดให้

- $f_{i,B}$ คือ สัดส่วนโดยมวลของโมเลกุล i ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)
 $f_{i,MCPOF}$ คือ สัดส่วนโดยมวลของโมเลกุล i ในเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (wt.%)
 i คือ องค์ประกอบที่คำนวณ ประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และเมทิลเอสเทอร์
 ρ_D คือ ความหนาแน่นของดีเซล (kg/□)
 ρ_{MCPOF} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (kg/□)
 V คือ สัดส่วนการผสมโดยปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล (decil)al)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมกับดีเซล (wt.%)

เชื้อเพลิง	TG	DG	MG	FFA	ME	ดีเซล
ดีเซล	-	-	-	-	-	100.00
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 10	8.74	0.85	0.11	1.32	-	88.98
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 20	17.29	1.68	0.22	2.62	-	78.20
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 30	25.64	2.49	0.32	3.88	-	67.66
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 40	33.81	3.28	0.43	5.12	-	57.36
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 50	41.81	4.06	0.53	6.33	-	47.28
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 60	49.63	4.82	0.63	7.51	-	37.42
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 80	64.78	6.29	0.82	9.80	-	18.31
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 100	79.30	7.70	1.00	12.00	-	-
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 10	9.67	0.94	0.12	0.30	-	88.97
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 20	19.12	1.85	0.24	0.59	-	78.19
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 30	28.37	2.75	0.36	0.87	-	67.65
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 40	37.40	3.63	0.47	1.15	-	57.35
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 50	46.25	4.48	0.58	1.42	-	47.27

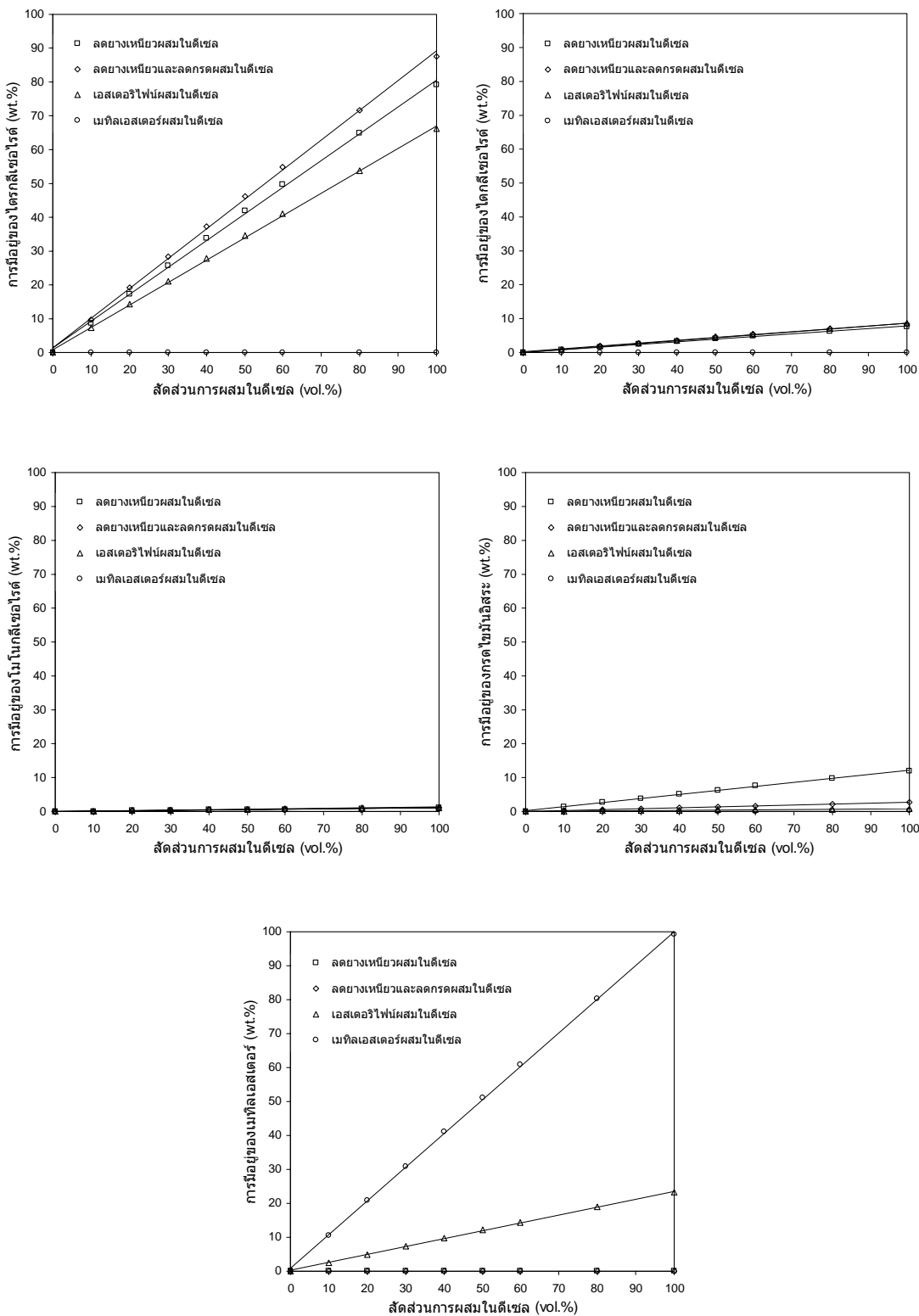
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมกับดีเซล (wt.%)

เชื้อเพลิง	TG	DG	MG	FFA	ME	ดีเซล
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 60	54.89	5.32	0.69	1.69	-	37.41
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 80	71.64	6.94	0.90	2.21	-	18.31
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 100	87.70	8.50	1.10	2.70	-	-
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 10	7.18	0.93	0.13	0.09	2.52	89.15
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 20	14.23	1.85	0.26	0.17	4.99	78.51
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 30	21.14	2.75	0.38	0.26	7.41	68.06
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 40	27.93	3.63	0.51	0.34	9.79	57.80
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 50	34.60	4.50	0.63	0.42	12.13	47.73
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 60	41.15	5.35	0.75	0.50	14.42	37.84
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 80	53.90	7.00	0.98	0.65	18.89	18.59
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 100	66.20	8.60	1.20	0.80	23.20	-
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 10	0.01	0.01	0.05	0.02	10.43	89.48
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 20	0.02	0.02	0.10	0.04	20.73	79.08
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 30	0.03	0.03	0.16	0.06	30.92	68.80
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 40	0.04	0.04	0.21	0.08	40.99	58.63
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 50	0.05	0.05	0.26	0.10	50.95	48.58
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 60	0.06	0.06	0.31	0.12	60.80	38.65
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 80	0.08	0.08	0.40	0.16	80.16	19.11
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 100	0.10	0.10	0.50	0.20	99.10	-

หมายเหตุ: 1. ตัวเลขหลังชนิดเชื้อเพลิง คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแต่ละเชื้อเพลิงที่ผสมในดีเซล (vol.%)

2. TG คือ ไตรกลีเซอไรด์; DG คือ ไดกลีเซอไรด์; MG คือ โมโนกลีเซอไรด์; FFA คือ กรดไขมันอิสระ; ME คือ เมทิลเอสเตอร์

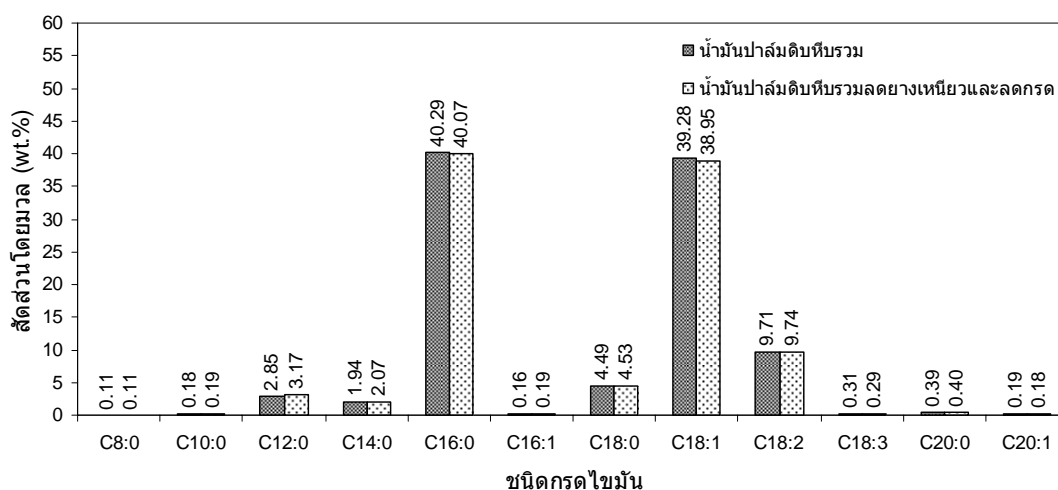
จากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดในตารางที่ 4.3 และกราฟรูปที่ 4.2 โดยภาพรวมจะเห็นว่า เชื้อเพลิงผสมทั้งหมดมีความแตกต่างขององค์ประกอบเรียงจากมากไปน้อย ดังนี้ ไตรกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเตอร์ กรดไขมันอิสระ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ นอกจากนี้จะเห็นว่า องค์ประกอบแต่ละตัวในเชื้อเพลิงผสมทุกชนิด มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับสัดส่วนการผสมโดยปริมาตร ดังนั้น การคำนวณอย่างง่ายด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วง สามารถคำนวณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมใกล้เคียงกับการคำนวณโดยตรง เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนพบว่า **ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์**สูงสุดของการคำนวณอย่างง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับ การคำนวณโดยตรง ขององค์ประกอบ ไตรกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเตอร์ กรดไขมันอิสระ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ มีค่าเป็น **2.3 1.4 0.3 0.2 และ 0.03 wt.% ตามลำดับ**



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม

4.2.2 ชนิดกรดไขมัน

การวิเคราะห์ชนิดกรดไขมัน ดังรูปที่ 4.3 พบผลที่น่าสนใจ คือ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีชนิดกรดไขมันที่ไม่แตกต่างกัน แต่งานวิจัยนี้ไม่สามารถอธิบายอย่างชัดเจนถึงเหตุผลของข้อค้นพบ อย่างไรก็ตาม คาดว่าลักษณะธรรมชาติของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม มีพฤติกรรมกระจายชนิดกรดไขมันในองค์ประกอบ ไตรกลีเซอไรด์ ไคคลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ สม่่าเสมอ ดังนั้น ถึงแม้องค์ประกอบเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากการเกิดสบู่และอีมีลชัน แต่ชนิดกรดไขมันที่ถูกกำจัดออกก็มีความสม่่าเสมอด้วยเหตุนี้ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดจึงมีชนิดกรดไขมันที่เหมือนกัน



รูปที่ 4.3 ชนิดกรดไขมันของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด

โดยสรุป การวิเคราะห์ชนิดกรดไขมันของเชื้อเพลิงที่ศึกษาบ่งบอกให้ทราบว่าน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม 4 ชนิด มีชนิดกรดไขมันเหมือนกัน

4.2.3 สูตรโมเลกุล

จากหัวข้อ 4.2.2 ที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมทั้งหมดมีชนิดกรดไขมันที่เหมือนกัน เพราะฉะนั้น สูตรโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระจึงเหมือนกัน คือ $C_{16.93}H_{32.66}O_2$ เมื่อนำสูตรโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระคำนวณร่วมกับน้ำหนักโมเลกุลของอะตอม คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.01 1.008 และ 16.00 g/mol ตามลำดับ (Perry et al., 1998) จะได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระ

เท่ากับ 268.2 kg/k \square l ซึ่งมีค่าระหว่างโมเลกุลกรดไขมันหลักของน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน 2 ชนิด คือ ปาล์มเมติก (C₁₆H₃₂O₂) [มีน้ำหนักโมเลกุล 256.4 kg/k \square l และเป็นชนิดกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน 40.29 wt.%] และโอเลอิก (C₁₈H₃₄O₂) [มีน้ำหนักโมเลกุล 282.5 kg/k \square l และเป็นชนิดกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน 39.28 wt.%] เมื่อนำสูตรโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยไปคำนวณต่อ จะได้สูตรโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุล ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลที่คำนวณนี้ มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เล็กน้อย (Kincs, 1985; Leevijit et al., 2004; Leevijit et al., 2008) เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนมีชนิดกรดไขมันห่วงโซ่คาร์บอนสั้นจากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (ตารางที่ 2.2) นอกจากนี้ ในตารางที่ 4.4 ยังแสดงสัดส่วนโดยมวลของอะตอม คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในโมเลกุลแต่ละชนิดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน

ตารางที่ 4.4 สูตรโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในโมเลกุลต่างๆ ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน

โมเลกุล	สูตรโมเลกุล	สูตรโมเลกุลลดทอน	น้ำหนักโมเลกุล (kg/k \square l)	สัดส่วนโดยมวล (wt.%)		
				คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
กรดไขมันอิสระ	C _{16.93} H _{32.66} O ₂	CH _{1.9291} O _{0.1182}	268.2	75.80	12.27	11.93
ไตรกลีเซอไรด์	C _{53.78} H _{99.97} O ₆	CH _{1.8587} O _{0.1116}	842.7	76.65	11.96	11.39
ไดกลีเซอไรด์	C _{36.86} H _{69.31} O ₅	CH _{1.8806} O _{0.1357}	592.5	74.71	11.79	13.50
โมโนกลีเซอไรด์	C _{19.93} H _{38.66} O ₄	CH _{1.9398} O _{0.2007}	342.3	69.92	11.38	18.70
เมทิลเอสเทอร์	C _{17.93} H _{34.66} O ₂	CH _{1.9331} O _{0.1116}	282.2	76.29	12.38	11.34

เมื่อนำสูตรโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลในตารางที่ 4.4 จำนวนร่วมกับองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน และเชื้อเพลิง 4 ชนิดที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน ในตารางที่ 4.2 จะได้สูตรโมเลกุลเฉลี่ย สูตรโมเลกุลลดทอน น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในโมเลกุลของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน ดังตารางที่ 4.5 จากนั้นนำสูตรโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน จำนวนร่วมกับสูตรโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลอ้างอิงของดีเซลรอปสูง ซึ่งมีสูตรโมเลกุล C_{12.30}H_{22.14} (CH_{1.8000}) และมีน้ำหนักโมเลกุล 170.0 kg/k \square l (Heywood, 1988) อ้างอิงความหนาแน่นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 30°C จะได้สูตรโมเลกุลเฉลี่ย สูตรโมเลกุลลดทอน น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในโมเลกุลของเชื้อเพลิงผสมแต่ละชนิด ที่สัดส่วนการผสมต่างๆ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 สูตรโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

เชื้อเพลิง	สูตรโมเลกุล	สูตรโมเลกุลลดทอน	น้ำหนักโมเลกุล (kg/kmol)	สัดส่วนโดยมวล (wt.%)		
				คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
ปาล์มดิบหีบรวม	C _{47.79} H _{89.04} O _{5.43}	CH _{1.8633} O _{0.1136}	750.6	76.47	11.96	11.57
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว	C _{47.72} H _{88.92} O _{5.42}	CH _{1.8634} O _{0.1136}	749.5	76.47	11.96	11.57
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด	C _{50.98} H _{94.87} O _{5.79}	CH _{1.8610} O _{0.1135}	800.5	76.48	11.95	11.57
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์	C _{43.31} H _{80.90} O _{4.93}	CH _{1.8681} O _{0.1138}	680.6	76.43	11.98	11.59
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม	C _{17.99} H _{34.77} O _{2.02}	CH _{1.9328} O _{0.1121}	283.4	76.23	12.37	11.40

ตารางที่ 4.6 สูตรโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในเชื้อเพลิงผสม ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมกับดีเซล

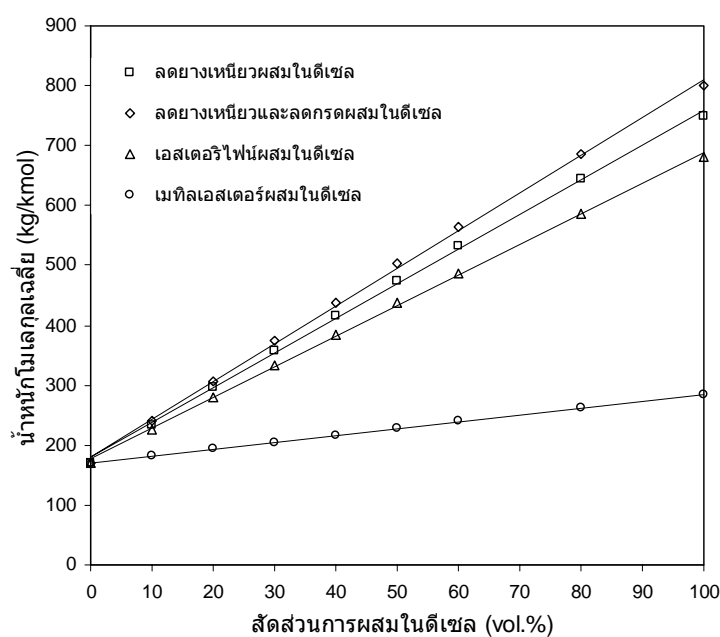
เชื้อเพลิง	สูตรโมเลกุล	สูตรโมเลกุลลดทอน	น้ำหนักโมเลกุล (kg/kmol)	สัดส่วนโดยมวล (wt.%)		
				คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
ดีเซล	C _{12.30} H _{22.14}	CH _{1.8000}	170.0	86.88	13.12	0.00
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 10	C _{16.20} H _{29.50} O _{0.60}	CH _{1.8206} O _{0.0369}	234.2	83.11	12.70	4.08
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 20	C _{20.02} H _{36.70} O _{1.18}	CH _{1.8329} O _{0.0590}	296.3	81.15	12.48	6.38
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 30	C _{23.75} H _{43.73} O _{1.75}	CH _{1.8412} O _{0.0738}	357.3	79.84	12.34	7.85
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 40	C _{27.40} H _{50.62} O _{2.31}	CH _{1.8471} O _{0.0843}	417.1	78.91	12.23	8.87
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 50	C _{30.97} H _{57.35} O _{2.86}	CH _{1.8515} O _{0.0923}	475.5	78.23	12.16	9.61
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 60	C _{34.47} H _{63.93} O _{3.39}	CH _{1.8549} O _{0.0984}	532.7	77.71	12.10	10.19
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 80	C _{41.23} H _{76.69} O _{4.43}	CH _{1.8599} O _{0.1074}	643.4	76.97	12.02	11.01
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว 100	C _{47.72} H _{88.92} O _{5.42}	CH _{1.8634} O _{0.1136}	749.5	76.47	11.96	11.57
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 10	C _{16.57} H _{30.16} O _{0.64}	CH _{1.8207} O _{0.0385}	239.6	83.02	12.69	4.26
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 20	C _{20.74} H _{38.00} O _{1.26}	CH _{1.8327} O _{0.0609}	307.6	80.97	12.45	6.57
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 30	C _{24.81} H _{45.66} O _{1.87}	CH _{1.8405} O _{0.0755}	373.9	79.69	12.31	8.01
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 40	C _{28.80} H _{53.16} O _{2.47}	CH _{1.8460} O _{0.0858}	439.0	78.78	12.21	9.00
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 50	C _{32.70} H _{60.49} O _{3.05}	CH _{1.8501} O _{0.0934}	502.5	78.15	12.13	9.72
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 60	C _{36.51} H _{67.66} O _{3.62}	CH _{1.8532} O _{0.0993}	564.6	77.66	12.08	10.27
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 80	C _{43.90} H _{81.55} O _{4.73}	CH _{1.8578} O _{0.1077}	685.1	76.95	12.00	11.05
ปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด 100	C _{50.98} H _{94.87} O _{5.79}	CH _{1.8610} O _{0.1135}	800.5	76.48	11.95	11.57
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 10	C _{15.66} H _{28.51} O _{0.53}	CH _{1.8204} O _{0.0341}	225.3	83.50	12.76	3.80
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 20	C _{18.96} H _{34.77} O _{1.06}	CH _{1.8333} O _{0.0559}	279.7	81.43	12.53	6.06
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 30	C _{22.20} H _{40.91} O _{1.57}	CH _{1.8423} O _{0.0709}	333.0	80.09	12.38	7.57
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 40	C _{25.39} H _{46.93} O _{2.08}	CH _{1.8489} O _{0.0819}	385.5	79.08	12.27	8.63
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 50	C _{28.51} H _{52.85} O _{2.58}	CH _{1.8539} O _{0.0904}	437.0	78.36	12.19	9.44
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 60	C _{31.57} H _{58.66} O _{3.06}	CH _{1.8579} O _{0.0971}	487.2	77.83	12.14	10.06
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 80	C _{37.55} H _{69.98} O _{4.01}	CH _{1.8638} O _{0.1069}	585.7	76.99	12.04	10.96
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 100	C _{43.31} H _{80.90} O _{4.93}	CH _{1.8681} O _{0.1138}	680.6	76.43	11.98	11.59

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) สูตรโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในเชื้อเพลิงผสม ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ผสมกับดีเซล

เชื้อเพลิง	สูตร โมเลกุล	สูตร โมเลกุล ลดทอน	น้ำหนักโมเลกุล (kg/kmol)	สัดส่วนโดยมวล (wt.%)		
				คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 10	$C_{12.90}H_{23.47}O_{0.21}$	$CH_{1.8195}O_{0.0165}$	181.9	85.14	13.00	1.87
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 20	$C_{13.49}H_{24.78}O_{0.42}$	$CH_{1.8337}O_{0.0313}$	193.7	83.64	12.90	3.49
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 30	$C_{14.08}H_{26.08}O_{0.63}$	$CH_{1.8529}O_{0.0448}$	205.5	82.27	12.79	4.91
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 40	$C_{14.65}H_{27.36}O_{0.84}$	$CH_{1.8674}O_{0.0570}$	217.0	81.12	12.71	6.16
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 50	$C_{15.23}H_{28.63}O_{1.04}$	$CH_{1.8806}O_{0.0682}$	228.4	80.06	12.64	7.28
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 60	$C_{15.79}H_{29.89}O_{1.24}$	$CH_{1.8928}O_{0.0785}$	239.6	79.15	12.57	8.28
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 80	$C_{16.90}H_{32.36}O_{1.63}$	$CH_{1.9143}O_{0.0976}$	261.7	77.58	12.46	9.99
เมทิลเอสเทอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 100	$C_{17.99}H_{34.77}O_{2.02}$	$CH_{1.9328}O_{0.1121}$	283.4	76.23	12.37	11.40

หมายเหตุ: ตัวเลขหลังชนิดเชื้อเพลิง คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแต่ละเชื้อเพลิงที่ผสมในดีเซล (vol.%)

เมื่อเขียนกราฟน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ดังรูปที่ 4.4 พบว่า น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสมทุกชนิด มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับสัดส่วนการผสมโดยปริมาตร ดังนั้น การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดอย่างง่ายด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณโดยตรง โดยค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยสำหรับ



รูปที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิงผสม

เชื้อเพลิงที่มีเมทิลเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก และจะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับเชื้อเพลิงที่มี ไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบสูง อย่างไรก็ตาม สำหรับเชื้อเพลิงทุกชนิด เมื่อผสมในดีเซล ที่สัดส่วน 0-100 vol.% ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของการประมาณค่าอย่างง่ายกับการคำนวณ โดยตรงมีค่า $\leq -3.9\%$

นอกจากนี้ ในรูปที่ 4.4 ยังพบว่า ที่สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ หีบรวมในดีเซลเท่ากัน เชื้อเพลิงผสมที่ได้จาก น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเรียงจากมากไปน้อย ตามลำดับ แต่ที่สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลไม่เท่ากัน มีความเป็นไปได้ที่เชื้อเพลิงผสมที่ผลิตจาก น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากัน

4.3 ความหนืดจลศาสตร์

4.3.1 ผลการทดลองและการวิจารณ์

ผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ ของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ในช่วงอุณหภูมิ 40-90°C แสดงดังตารางที่ 4.7

สำหรับมาตรฐานดีเซล กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดคุณสมบัติความหนืดจลศาสตร์ ที่อุณหภูมิอ้างอิง 40°C ดังตารางที่ 1.1 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ใน ตารางที่ 4.7 พบว่า เชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด มีความหนืดจลศาสตร์แตกต่างกันมาก โดยน้ำมันปาล์มดิบ หีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ มีความหนืดจลศาสตร์ 41.1 37.8 23.9 และ 5.05 cSt เรียงจาก มากไปน้อย ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานดีเซลในตารางที่ 1.1 พบว่า ความหนืดจลศาสตร์ ของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด ไม่ผ่านมาตรฐานดีเซลทุกประเภท ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์มีความหนืด จลศาสตร์ผ่านมาตรฐานดีเซลหมุนช้า และดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร แต่ไม่ผ่านมาตรฐานดีเซล หมุนเร็ว

เมื่อพิจารณาสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด สำหรับมาตรฐานดีเซลหมุนช้าและดีเซล เครื่องยนต์การเกษตร น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 40 vol.% ส่วนน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 20 vol.% เท่ากัน สำหรับมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว เชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด ไม่สามารถผสมในดีเซลได้ทั้งหมด ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 60 vol.%

ตารางที่ 4.7 ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมในช่วงอุณหภูมิ 40-90°C

สัดส่วนการผสม เชื้อเพลิงทดแทน ดีเซลในดีเซล (vol.%)	ความหนืดจลศาสตร์ (cSt) ของเชื้อเพลิงผสมชนิดต่างๆ												
	น้ำมันปาล์มดิบที่บวม ลดยางหนืดผสมในดีเซล			น้ำมันปาล์มดิบที่บวมลดยางหนืด และลดครดผสมในดีเซล			น้ำมันปาล์มดิบที่บวม เอสเทอร์ไฟน์ผสมในดีเซล			เมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล			
	อุณหภูมิ (°C)			อุณหภูมิ (°C)			อุณหภูมิ (°C)			อุณหภูมิ (°C)			
	40	50	70	40	50	70	40	50	70	40	50	70	90
0	3.24	2.73	1.97	3.24	2.73	1.97	3.24	2.73	1.97	3.24	2.73	1.97	1.46
20	5.25	4.16	2.93	5.24	4.21	2.96	4.67	3.88	2.73	3.48	2.90	2.22	1.63
40	8.51	6.76	4.38	8.77	6.94	4.46	7.11	5.98	3.83	3.76	3.17	2.38	1.70
60	13.7	10.8	6.69	14.7	11.3	6.88	10.9	8.60	5.36	4.10	3.39	2.48	1.86
80	23.6	18.4	10.3	24.2	19.5	10.7	16.1	12.2	7.56	4.49	3.75	2.71	1.99
100	37.8	28.7	16.2	41.1	30.6	17.0	23.9	18.1	10.6	5.05	4.05	2.88	2.11

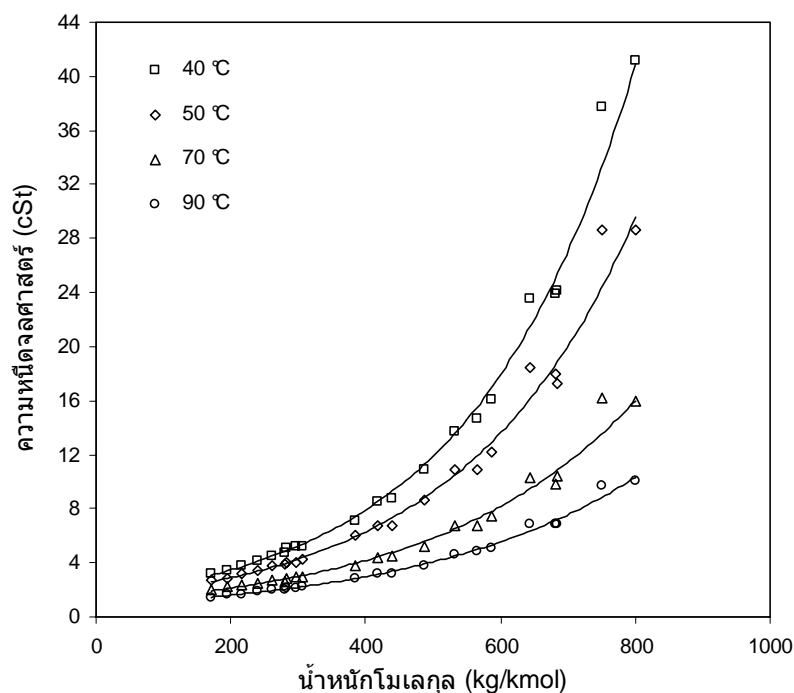
อย่างไรก็ตาม การสรุปสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด ของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด ที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการสรุปตามผลการทดสอบเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสม มีช่วงทดสอบที่กว้าง (ช่วงสัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงในดีเซล 20 vol.%) แต่ช่วงการทดสอบดังกล่าวสามารถทดสอบได้ง่าย และสะดวก เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพความหนืดจลศาสตร์ ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ให้ผ่านมาตรฐานดีเซลเพิ่มมากขึ้น จึงนำผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ สร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.3 ต่อไป

4.3.2 ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมในทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

ถึงแม้ว่าการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดจะได้ข้อสรุปที่เด่นชัด และสามารถใช้เป็นข้อมูลสร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.3.1

สำหรับเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดที่ทดสอบ การวิเคราะห์ตัวแปรองค์ประกอบพื้นฐานของเชื้อเพลิง ที่เป็นตัวร่วมโดยเฉพาะ อาจได้ข้อสรุปที่มีประโยชน์ และมีนัยสำคัญ สามารถอธิบายพฤติกรรมความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสม ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงลงเขียนกราฟความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสม ให้อยู่ในตัวแปรที่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงผสมในรูปแบบต่างๆ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจลศาสตร์กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด (ตารางที่ 4.6) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่า ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมจะเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยในรูปสมการเอ็กโปเนนเชียลที่อุณหภูมิเท่ากัน และมีพฤติกรรมเหมือนกันทุกช่วงอุณหภูมิ ข้อค้นพบนี้ ทำให้ทราบว่า เชื้อเพลิงผสมทั้ง 4 ชนิด มีพฤติกรรมพื้นฐานร่วมกัน ดังนั้น การสร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.3.3 ถัดไป สามารถสร้างสมการทำนายเชื้อเพลิงผสมทั้ง 4 ชนิด ร่วมกันได้



รูปที่ 4.5 ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

4.3.3 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์

4.3.3.1 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม

ความหนืดพลวัตของของเหลวผสมสามารถทำนายด้วยสมการที่ 4.3 (Grunberg and Nissan, 1949)

$$\ln \mu_m = \sum_{i=1}^n x_i \ln \mu_i + \sum_{i \neq j}^n \sum_j^n x_i x_j Q_{ij} \quad (4.3)$$

กำหนดให้

- μ_m คือ ความหนืดพลวัตเฉลี่ยของเหลวผสม
- μ_i คือ ความหนืดพลวัตของเหลวแต่ละองค์ประกอบ i
- n คือ จำนวนองค์ประกอบ
- Q_{ij} คือ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวผสม
- x_i และ x_j คือ สัดส่วนโมลขององค์ประกอบ i และ j

น้ำมันพืชเป็นของเหลวผสมที่มีองค์ประกอบกรดไขมันคล้ายกัน เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.3 ตัวแปร Q_{ij} เกิดขึ้นน้อยมากและไม่มีนัยสำคัญ สามารถลดรูปสมการดังสมการที่ 4.4 (Perry et al., 1998)

$$\ln \mu_m = \sum_{i=1}^n x_i \ln \mu_i \quad (4.4)$$

งานวิจัยนี้ เปลี่ยนตัวแปรทำนายความหนืดพลวัต (μ) ของสมการที่ 4.4 เป็นความหนืดจลศาสตร์ (ν) ดังสมการที่ 4.5 เนื่องจากการทำนายความหนืดจลศาสตร์สามารถเปรียบเทียบมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของกรมธุรกิจพลังงาน ประเทศไทย โดยตรง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยบางชิ้นเลือกการทำนายความหนืดจลศาสตร์โดยเฉพาะ เนื่องจากความหนืดจลศาสตร์ทำนายได้ง่าย และสะดวกต่อการเปรียบเทียบผลการทดลอง (Abolle et al., 2009)

$$\ln \nu_m = \sum_{i=1}^n V_i \ln \nu_i \quad (4.5)$$

$$\nu_m = e^{\sum_{i=1}^n V_i \ln \nu_i} \quad (4.6)$$

กำหนดให้

- ν_m คือ ความหนืดจลศาสตร์เฉลี่ยของเหลวผสม (cSt)
- ν_i คือ ความหนืดจลศาสตร์ของเหลวแต่ละองค์ประกอบ i (cSt)
- V_i คือ สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบ i (decimal)

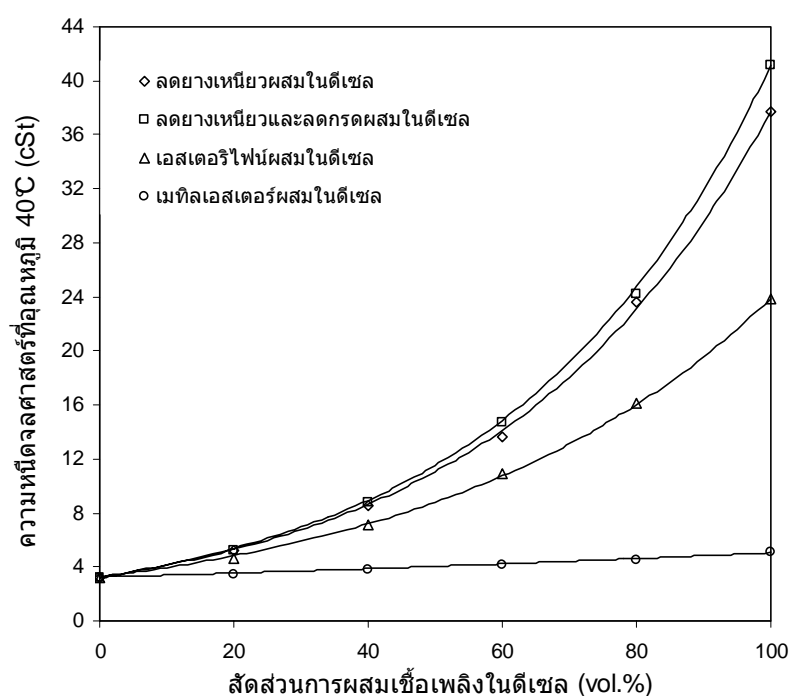
จากสมการที่ 4.6 เปลี่ยนรูปสมการดังสมการที่ 4.7 ได้สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการดังกล่าว ทำนายความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บวมผสมในดีเซลที่อุณหภูมิมาตรฐาน 40°C

$$\nu_{B,40} = e^{\{(1-V_F) \ln \nu_{D,40} + V_F \ln \nu_{F,40}\}} \quad (4.7)$$

กำหนดให้

- $V_{B,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)
 $V_{D,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์ดีเซลที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)
 $V_{F,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)
 V_F คือ สัดส่วนปริมาตรของเชื้อเพลิงในดีเซล (decil)

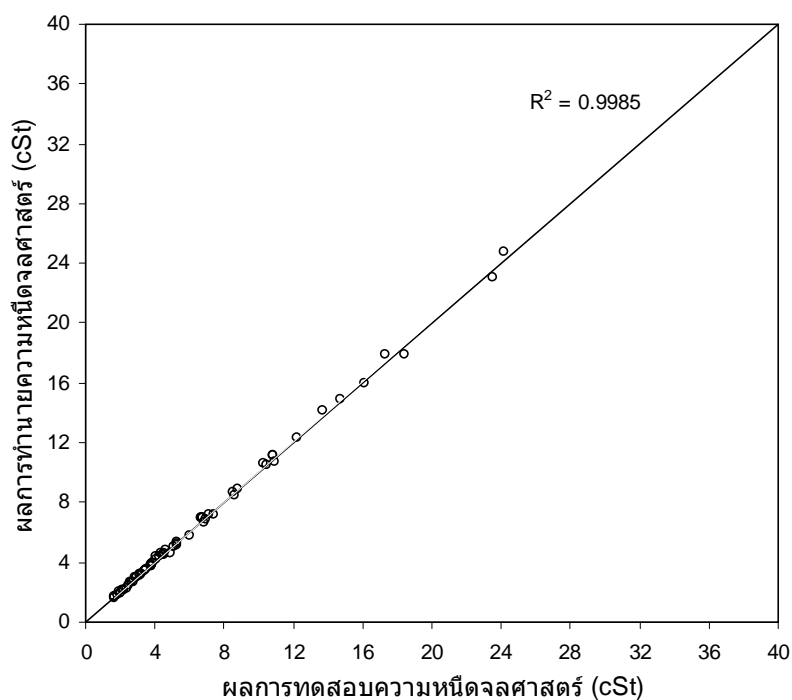
ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ด้วยสมการที่ 4.7 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมที่อุณหภูมิ 40°C ได้ผลดังรูปที่ 4.6 และใช้สมการเดียวกันทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 50 70 และ 90°C ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ยด้วยสมการที่ 3.1 การทำนายความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ 40 50 70 และ 90°C ตามลำดับ มีค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ยไม่เกิน 2.65%



รูปที่ 4.6 ความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40°C (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)

เมื่อเขียนกราฟผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ด้วยสมการทำนายความหนืดที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม ดังรูปที่ 4.7

จะเห็นได้ว่า ค่า R^2 สูงกว่า 0.95 (สมการที่ 3.2) เพราะฉะนั้น สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมให้ผลการทำนายที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถยอมรับได้ในทางสถิติวิศวกรรม



รูปที่ 4.7 ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ต่อผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)

4.3.3.2 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ

ความหนืดพลวัตของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สามารถทำนายด้วยสมการที่ 4.8 (Andrade, 1930) จัดรูปสมการที่ 4.8 ให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติดังสมการที่ 4.9

$$\mu = Ae^{-\left(\frac{\Delta G_{vis}}{RT}\right)} \quad (4.8)$$

$$\ln \mu = \ln A - \frac{\Delta G_{vis}}{RT} \quad (4.9)$$

กำหนดให้

- μ คือ ความหนืดพลวัต
 A คือ ค่าคงที่
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
 ΔG_{vis} คือ พลังงานกระตุ้นของการไหล

องค์ประกอบ ΔG° ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงดังสมการที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ (Jones and Martin, 1952)

$$\Delta G_n = \Delta G_n^\circ + n\delta G \quad (4.10)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (4.11)$$

กำหนดให้

- ΔG_n คือ พลังงานอิสระของคาร์บอนอะตอม
 n คือ จำนวนอะตอมคาร์บอน
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
 δG คือ พลังงานอิสระที่เพิ่มขึ้นต่อจำนวนอะตอมคาร์บอน
 ΔH° คือ ค่าของเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง
 ΔS° คือ ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลง

แทน (4.10) และ (4.11) ใน (4.9) ได้สมการที่ 4.12 จัดรูปสมการดังสมการที่ 4.13

$$\ln \mu = \ln A - \frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{n\delta H}{R} - \frac{n\delta S}{R} \quad (4.12)$$

$$\ln \mu = a + bn + \frac{c}{T} + \frac{dn}{T} \quad (4.13)$$

เมื่อ $a = \ln A + \frac{\Delta S^\circ}{R}$ $b = -\frac{\delta S}{R}$ $c = -\frac{\Delta H^\circ}{R}$ และ $d = -\frac{\delta H}{R}$ ตามลำดับ

$$\ln \mu = a' + \frac{b'}{T} \quad (4.14)$$

เมื่อ $a' = a + bn$ และ $b' = c + dn$

$$\mu = e^{a'T+b'} \quad (4.15)$$

นอกจากนี้ ความหนืดพลวัตของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ยังสามารถทำนายด้วยสมการอื่นๆ เช่น สมการที่ 4.26 (Perry et al., 1998)

$$\log \mu = B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) - 3 \quad (4.16)$$

จากสมการที่ 4.16 เทอม $\frac{B}{T_0}$ มีค่าน้อยมากและไม่มีนัยสำคัญ ส่วนเทอม -3 คือค่าคงที่และถูกกำหนดเป็น A ดังสมการที่ 4.17

$$\log \mu = A + \frac{B}{T} \quad (4.17)$$

พิจารณาสมการที่ 4.14 และ 4.17 จะเห็นได้ว่า สมการทำนายทั้งสองมีรูปแบบคล้ายกัน ดังนั้น สมการทำนายดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือ งานวิจัยนี้นำสมการที่ 4.15 ซึ่งได้จากสมการที่ 4.14 เปลี่ยนตัวแปรทำนายความหนืดพลวัต (μ) เป็นความหนืดจลศาสตร์ (ν) เหมือนงานวิจัยบางชิ้นที่ต้องการทำนายความหนืดจลศาสตร์โดยเฉพาะ (Abolle et al., 2009) นอกจากนี้ยังเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ a' และ b' เป็น A และ B ตามลำดับ ดังสมการที่ 4.18

$$\nu_T = e^{AT+B} \quad (4.18)$$

เมื่อนำสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A และ B จากสมการที่ 4.18 ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ที่สัดส่วนต่างๆ พล็อตกราฟร่วมกับลอการิทึมธรรมชาติของความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40°C ($\ln \nu_{40}$) ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ที่สัดส่วนต่างๆ เบื้องต้น ได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง แต่การนำสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A พล็อตกราฟกับลอการิทึมธรรมชาติความหนืดจลศาสตร์ที่ 40°C ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่า ความชันที่ได้มีค่าเป็นลบ เพื่อสะดวกต่อการอ่านกราฟ จึงเปลี่ยนสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A เป็นลบ เพื่อให้ความชันที่ได้มีค่าเป็นบวก ดังสมการที่ 4.19

$$v_T = e^{-AT+B} \quad (4.19)$$

กำหนดให้

- v_T คือ ความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ T (cSt)
 T คือ อุณหภูมิในช่วง $40-90^\circ\text{C}$
 A คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
 B คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A และ B จากสมการที่ 4.19 พล็อตกราฟร่วมกับลอการิทึมธรรมชาติของความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40°C ($\ln v_{40}$) ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมในดีเซล ที่สัดส่วนต่างๆ ได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 4.20 และ 4.21 ซึ่งสมการที่ 4.20 แสดงดังรูปที่ 4.8 ส่วนสมการที่ 4.21 แสดงดังรูปที่ 4.9

$$A = C_1 \ln v_{40} + C_2 \quad (4.20)$$

$$B = C_3 \ln v_{40} + C_4 \quad (4.21)$$

กำหนดให้

- A คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
 B คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
 v_{40} คือ ความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)
 C_1 C_2 C_3 และ C_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

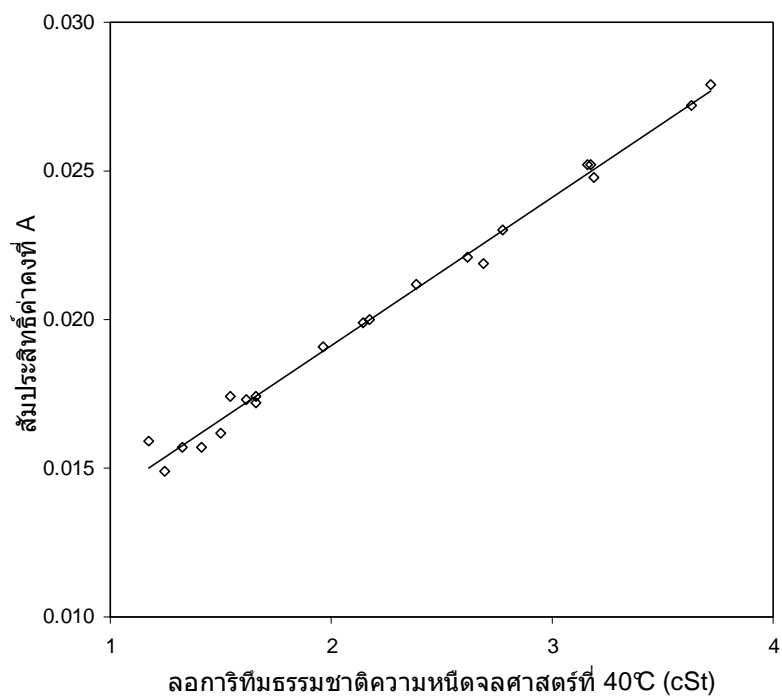
จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 ได้สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมในดีเซลที่สัดส่วนต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ $40-90^\circ\text{C}$ ดังนี้

$$C_1 = 5.08662 \times 10^{-3}$$

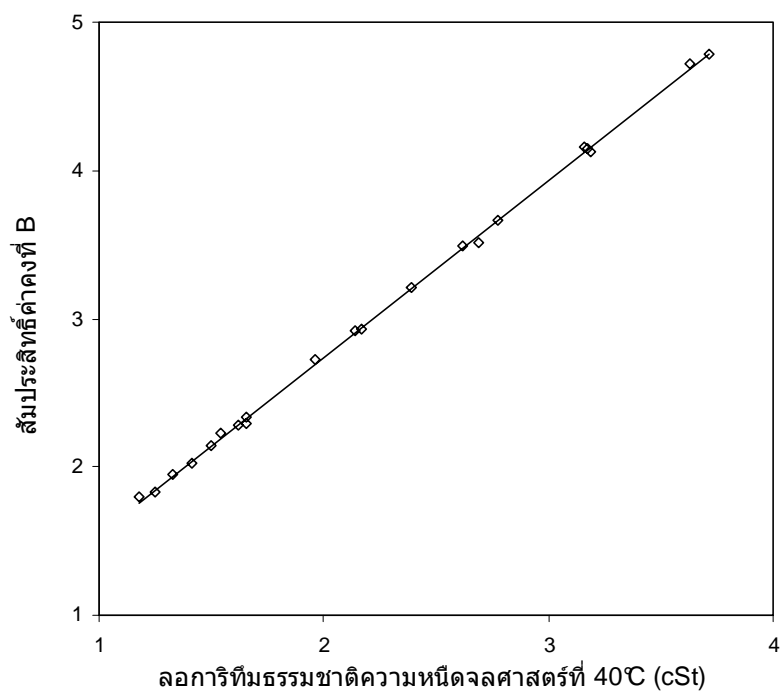
$$C_2 = 8.96615 \times 10^{-3}$$

$$C_3 = 1.20440$$

$$C_4 = 3.40432 \times 10^{-1}$$



รูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A



รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ B

แทน (4.20) และ (4.21) ลงใน (4.19) ดังสมการที่ 4.22 ได้สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ

$$V_T = e^{-(C_1 \ln v_{40} + C_2)T + C_3 \ln v_{40} + C_4} \quad (4.22)$$

กำหนดให้

v_T คือ ความหนืดจลศาสตร์ที่อุณหภูมิ T (cSt)

v_{40} คือ ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิอ้างอิง 40°C (cSt)

T คือ อุณหภูมิในช่วง $40\text{-}90^\circ\text{C}$

C_1 C_2 C_3 และ C_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

ขั้นตอนต่อไป ใช้สมการที่ 4.22 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ ทำนายความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ช่วงอุณหภูมิ $40\text{-}90^\circ\text{C}$ ผลการทำนายแสดงเฉพาะน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวผสมในดีเซล รูปที่ 4.10 เมื่อวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ยด้วยสมการที่ 3.1 การทำนายความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ช่วงอุณหภูมิ $40\text{-}90^\circ\text{C}$ มีค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ยไม่เกิน 3.51%

เมื่อเขียนกราฟผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ด้วยสมการทำนายความหนืดที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่า R^2 สูงกว่า 0.95 (สมการที่ 3.2) ดังนั้น สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิให้ผลการทำนายที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถยอมรับได้ในทางสถิติวิศวกรรม

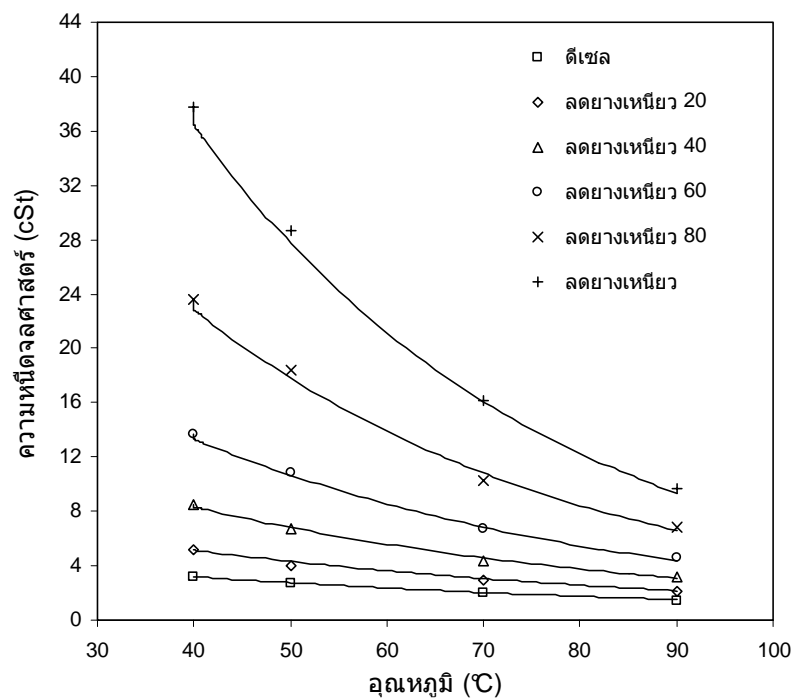
4.3.3.3 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ

พิจารณาสมการที่ 4.22 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ กำหนดให้ $\ln v_{B,40}$ เป็น $\ln v_{40}$ ดังสมการที่ 4.23

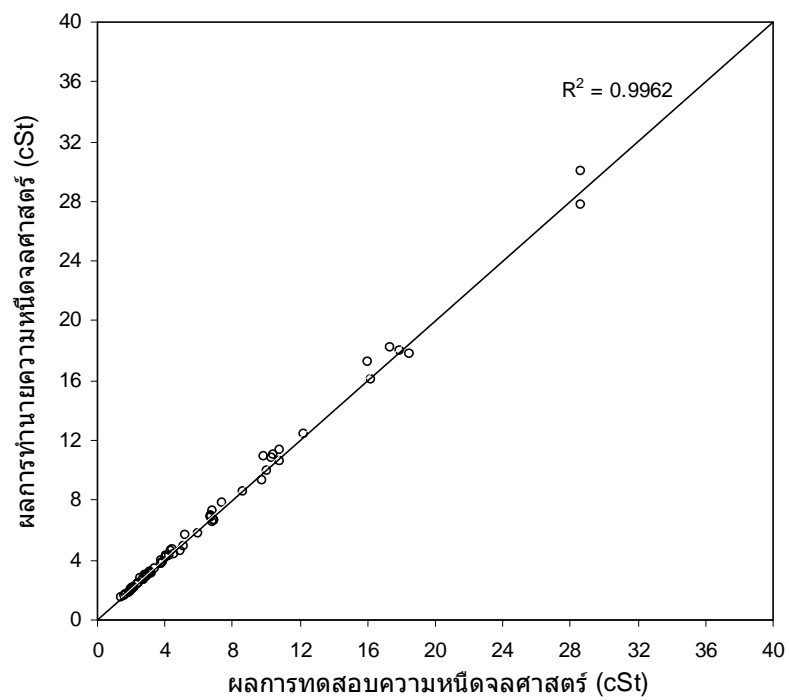
$$V_{B,T} = e^{\{-(c_1 \ln v_{B,40} + c_2)T + (c_3 \ln v_{B,40} + c_4)\}} \quad (4.23)$$

$$\ln v_{B,T} = -(c_1 \ln v_{B,40} + c_2)T + (c_3 \ln v_{B,40} + c_4) \quad (4.24)$$

แทน (4.7) ใน (4.24) ดังสมการที่ 4.25



รูปที่ 4.10 ความหนืดจลศาสตร์ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม
ลดยางเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.11 ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ต่อผลการทดสอบ
ความหนืดจลศาสตร์ (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)

$$\ln v_{B,T} = -(c_1 \ln e^{\{(1-V_F)\ln v_{D,40} + V_F \ln v_{F,40}\}} + c_2)T + (c_3 \ln e^{\{(1-V_F)\ln v_{D,40} + V_F \ln v_{F,40}\}} + c_4) \quad (4.25)$$

$$\ln v_{B,T} = -(C_1((1-V_F)\ln v_{D,40} + V_F \ln v_{F,40}) + C_2)T + (C_3((1-V_F)\ln v_{D,40} + V_F \ln v_{F,40})) + C_4 \quad (4.26)$$

$$\ln v_{B,T} = -C_1 T \ln v_{D,40} + C_1 V_F T \ln v_{D,40} - C_1 V_F T \ln v_{F,40} - C_2 T + C_3 \ln v_{D,40} - C_3 V_F \ln v_{D,40} + C_3 V_F \ln v_{F,40} + C_4 \quad (4.27)$$

จัดรูปสมการที่ 4.27 ดังสมการที่ 4.28 ได้สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ

$$v_{B,T} = e^{(-C_1 T \ln v_{D,40} - C_2 T + C_3 \ln v_{D,40} + C_4) + (C_1 T \ln v_{D,40} - C_1 T \ln v_{F,40} - C_3 \ln v_{D,40} + C_3 \ln v_{F,40}) V_F} \quad (4.28)$$

กำหนดให้

- $v_{B,T}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิต่างๆ (cSt)
- $v_{D,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์ดีเซลที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)
- $v_{F,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)
- T คือ อุณหภูมิในช่วง 40-90°C
- V_F คือ สัดส่วนปริมาตรของเชื้อเพลิงในดีเซล (decil)l)
- C_1 C_2 C_3 และ C_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซลที่สัดส่วนต่างๆ ช่วงอุณหภูมิ 40-90°C ด้วยสมการที่ 4.28 สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ ผลการทำนายแสดงเฉพาะน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล รูปที่ 4.12 เมื่อวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ยด้วยสมการที่ 3.1 การทำนายความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสม ช่วงอุณหภูมิ 40-90°C มีค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เฉลี่ยไม่เกิน 3.92%

เมื่อเขียนกราฟผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ด้วยสมการทำนายความหนืดที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า ค่า R^2 สูงกว่า 0.95 (สมการที่ 3.2) เพราะฉะนั้น สมการทำนายความหนืดจลศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิให้ผลการทำนายที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถยอมรับได้ในทางสถิติวิศวกรรม

4.3.3.4 สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ

กำหนดให้

- $v_{St,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์สูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน สำหรับดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร และดีเซลหมุนช้า 8.0 cSt ส่วนดีเซลหมุนเร็ว 4.1 cSt
- $V_{F \max}$ คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลสูงสุด (vol.%)

จากสมการที่ 4.7 แทน $\ln v_{St,40}$ ใน $\ln v_{B,T}$ และแทน $V_{F \max}$ ใน V_F ดังสมการที่ 4.29

$$v_{St,40} = e^{\{(1-V_{F \max}) \ln v_{D,40} + V_{F \max} \ln v_{F,40}\}} \quad (4.29)$$

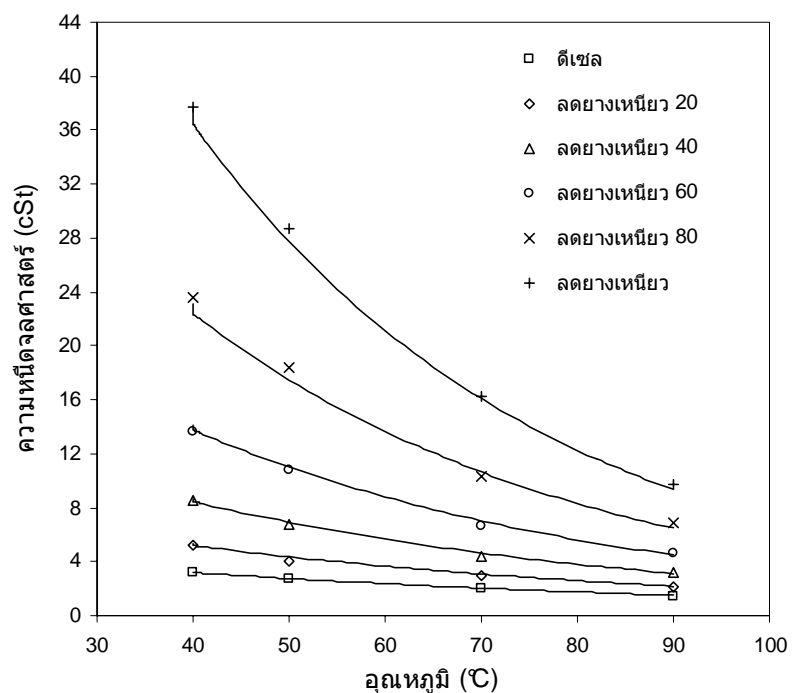
$$\ln v_{St,40} = (1 - V_{F \max}) \ln v_{D,40} + V_{F \max} \ln v_{F,40} \quad (4.30)$$

$$\ln v_{St,40} = \ln v_{D,40} - V_{F \max} \ln v_{D,40} + V_{F \max} \ln v_{F,40} \quad (4.31)$$

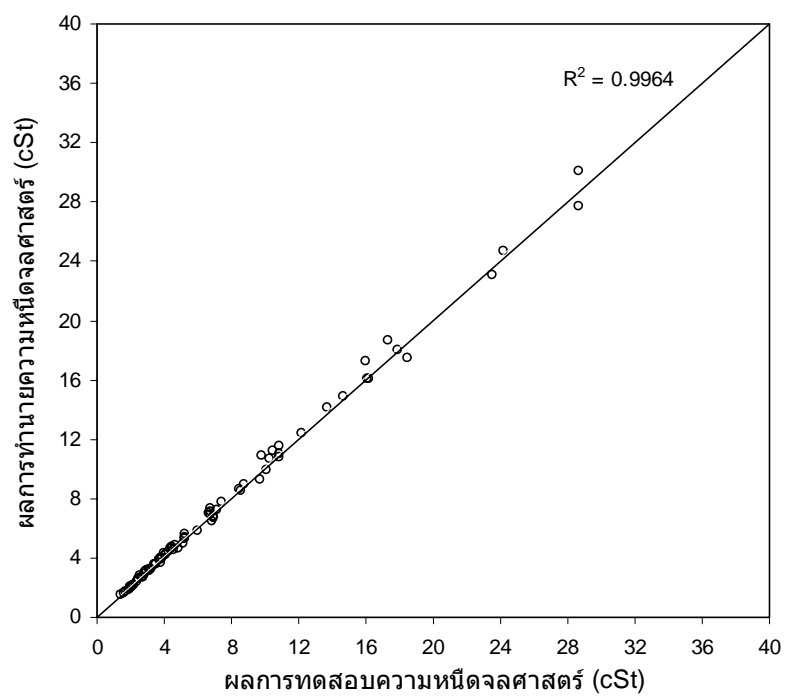
$$\ln v_{St,40} - \ln v_{D,40} = V_{F \max} (\ln v_{F,40} - \ln v_{D,40}) \quad (4.32)$$

$$V_{F \max} = \frac{\ln v_{St,40} - \ln v_{D,40}}{\ln v_{F,40} - \ln v_{D,40}} \quad (4.33)$$

จัดรูปสมการที่ 4.33 ดังสมการที่ 4.34 ได้สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสม



รูปที่ 4.12 ความหนืดจลศาสตร์ของน้ำมันปาล์มคิบที่บรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.13 ผลการทำนายความหนืดจลศาสตร์ต่อผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)

$$V_{F \max} = \frac{\ln(v_{Sr,40} / v_{D,40})}{\ln(v_{F,40} / v_{D,40})} \quad (4.34)$$

กำหนดให้

$V_{F \max}$ คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซล
สูงสุด (vol.%)

$v_{D,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์ดีเซลที่อุณหภูมิ 40°C (cSt)

$v_{F,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่
อุณหภูมิ 40°C (cSt)

$v_{Sr,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์สูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน สำหรับดีเซลเครื่องยนต์
การเกษตร และดีเซลหมุนช้า 8.0 cSt ส่วนดีเซลหมุนเร็ว 4.1 cSt

จากสมการที่ 4.28 แทน $\ln v_{Sr,40}$ ใน $\ln v_{B,T}$ และแทน $V_{F \max}$ ใน V_F ดังสมการที่ 4.35

$$\ln v_{Sr,40} = (-C_1 T \ln v_{D,40} - C_2 T + C_3 \ln v_{D,40} + C_4) + (C_1 T \ln v_{D,40} - C_1 T \ln v_{F,40} - C_3 \ln v_{D,40} + C_3 \ln v_{F,40}) V_{F \max} \quad (4.35)$$

$$V_{F \max} = \frac{\ln v_{Sr,40} - (-C_1 T \ln v_{D,40} - C_2 T + C_3 \ln v_{D,40} + C_4)}{C_1 T \ln v_{D,40} - C_1 T \ln v_{F,40} - C_3 \ln v_{D,40} + C_3 \ln v_{F,40}} \quad (4.36)$$

$$V_{F \max} = \frac{\ln v_{Sr,40} - ((C_3 - C_1 T) \ln v_{D,40}) + (C_2 T - C_4)}{-((C_3 - C_1 T) \ln v_{D,40}) + (C_3 - C_1 T) \ln v_{F,40}} \quad (4.37)$$

$$V_{F \max} = \frac{\ln v_{Sr,40} - ((C_3 - C_1 T) \ln v_{D,40}) + (C_2 T - C_4)}{(C_3 - C_1 T)(\ln v_{F,40} - \ln v_{D,40})} \quad (4.38)$$

$$V_{F \max} = \frac{\ln v_{Sr,40} - \ln v_{D,40}^{(C_3 - C_1 T)} + (C_2 T - C_4)}{(\ln v_{F,40} / \ln v_{D,40})^{(C_3 - C_1 T)}} \quad (4.39)$$

จัดรูปสมการที่ 4.39 ดังสมการที่ 4.40 ได้สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของ
เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐาน
ดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ

$$V_{F \max} = \frac{\ln(v_{St,40} / v_{D,40}^{(C_3 - C_1 T)}) + (C_2 T - C_4)}{(\ln v_{F,40} / \ln v_{D,40})^{(C_3 - C_1 T)}} \quad (4.40)$$

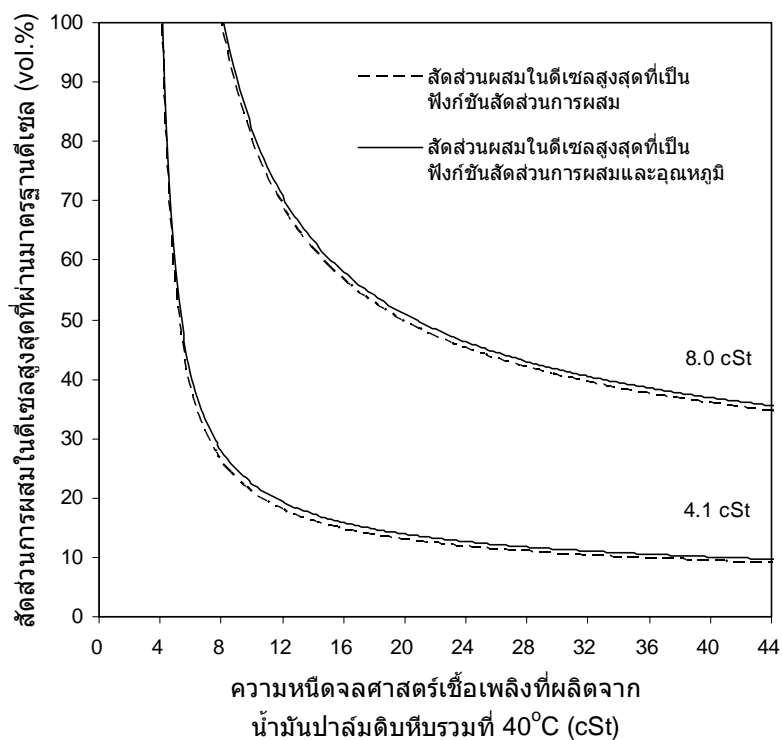
กำหนดให้

- $V_{F \max}$ คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลสูงสุด (vol.%)
- $v_{D,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์ดีเซลที่อุณหภูมิ 40 °C (cSt)
- $v_{F,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิ 40 °C (cSt)
- $v_{St,40}$ คือ ความหนืดจลศาสตร์สูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน สำหรับดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร และดีเซลหมุนช้า 8.0 cSt ส่วนดีเซลหมุนเร็ว 4.1 cSt
- T คือ อุณหภูมิในช่วง 40-90°C
- C_1 C_2 C_3 และ C_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

สำหรับขั้นตอนการสร้างสมการที่ 4.40 (สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ) ได้นำผลการทดสอบความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.2) วิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะร่วมกัน (C_1 C_2 C_3 และ C_4) ซึ่งเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด เมื่อผสมในดีเซล ถูกพิสูจน์พบว่า มีพฤติกรรมพื้นฐานร่วมกัน กล่าวคือ ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดจะเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่อุณหภูมิเท่ากัน (รูปที่ 4.5) ด้วยเหตุผลดังกล่าว สมการที่ 4.40 สามารถใช้เป็นเครื่องมือทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด ของเชื้อเพลิงทุกชนิดที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ

ผลการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงทุกชนิดที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ด้วยสมการทำนายที่ 4.40 ได้ผลการทำนาย ดังรูปที่ 4.14 นอกจากนี้ยังใช้ สมการที่ 4.34 (สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสม) ทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ

หีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ดังรูปที่ 4.14 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.14 สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด ทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด ด้วยสมการที่ 4.40 (สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิจึง) สามารถสรุปสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด ดังตารางที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด มีสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด 46 38 และ 36 vol.% ตามลำดับ โดยที่ความหนืดจลศาสตร์เชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตรและดีเซลหมุนช้าที่อุณหภูมิจึง 40°C สำหรับมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วที่อุณหภูมิจึง 40°C เมทิลเอสเทอร์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด มีสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด 57 13 10 และ 10 vol.% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนในดีเซลสูงสุด ที่ช่วงอุณหภูมิ 40-90°C โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย

ชนิดเชื้อเพลิง	สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลในดีเซลสูงสุด (vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานประเภทต่างๆ							
	ดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร และดีเซลหมุนช้า				ดีเซลหมุนเร็ว			
	อุณหภูมิ (°C)				อุณหภูมิ (°C)			
	40	50	70	90	40	50	70	90
1. น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน ลดยางเหนียว	38	46	66	91	10	17	34	55
2. น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน ลดยางเหนียวและลดกรด	36	44	64	88	10	17	33	53
3. น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมน เอสเตอรีไฟน์	46	56	81	100	13	21	41	67
4. เมทิลเอสเตอรี	100	100	100	100	57	95	100	100

4.4 ความหนาแน่น

4.4.1 ผลการทดลองและการวิจารณ์

ผลการทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C แสดงดังตารางที่ 4.9

สำหรับมาตรฐานดีเซล กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดคุณสมบัติความหนาแน่น ของดีเซลหมุนเร็ว ดีเซลหมุนช้า และดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร ที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6 15.6 และ 15°C ตามลำดับ แต่จากการตรวจสอบโดยการประมาณค่าในช่วง พบว่า ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทดสอบที่อุณหภูมิ 15 และ 15.6°C มีความแตกต่างกันน้อยมาก และไม่มีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนอุณหภูมิอ้างอิงมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตรเป็น 15.6°C แต่ยังคงค่าความหนาแน่นเท่าเดิม ทั้งนี้เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบมาตรฐานดีเซลทั้งหมด

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความหนาแน่นในตารางที่ 4.9 พบว่า เชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด มีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก ยกเว้นน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนลดยางเหนียวและลดกรดที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน โดยน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนเอสเตอรีไฟน์ และเมทิลเอสเตอรี มีความหนาแน่น 932 931 915 และ 884 kg/m³ เรียงจากมากไปน้อย ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบมาตรฐานดีเซลในตารางที่ 1.1 พบว่า ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทั้งหมด ไม่ผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร ยกเว้นเมทิลเอสเตอรี สำหรับมาตรฐานดีเซลรอบต่ำ น้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนเอสเตอรีไฟน์ และเมทิลเอสเตอรีมีความหนาแน่นผ่านมาตรฐาน ส่วนน้ำมันอีก 2

ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C

สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลในดีเซล (vol.%)	ความหนาแน่น (kg/l) ของเชื้อเพลิงผสมชนิดต่างๆ															
	น้ำมันปาล์มดิบที่รวมลดของหนึชยผสมในดีเซล				น้ำมันปาล์มดิบที่รวมลดของหนึชยและลดกรดผสมในดีเซล				น้ำมันปาล์มดิบที่รวมลดของหนึชยผสมในดีเซล				น้ำมันปาล์มดิบที่รวมลดของหนึชยผสมในดีเซล			
	อุณหภูมิ (°C)				อุณหภูมิ (°C)				อุณหภูมิ (°C)				อุณหภูมิ (°C)			
	15.6	40	60	80	100	80	60	40	15.6	40	60	80	100	80	60	40
0	835	817	806	794	786	794	806	817	835	817	806	794	786	794	806	817
20	854	833	818	807	800	807	822	836	856	836	822	810	801	809	821	834
40	869	847	831	820	812	820	838	853	874	853	838	826	817	822	834	847
60	886	863	849	835	827	835	857	872	894	872	857	845	836	837	850	863
80	911	885	872	854	848	854	875	888	912	888	875	862	855	853	863	878
100	931	908	890	880	869	880	890	908	932	908	890	880	871	870	882	895

ชนิดที่เหลือ ความหนาแน่นไม่ผ่านมาตรฐาน เมื่อพิจารณามาตรฐานดีเซลรอบสูง ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทั้งหมด ไม่ผ่านมาตรฐานดีเซลรอบสูง

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นดีเซลที่อุณหภูมิ 15.6°C พบว่า ความหนาแน่นดีเซลมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นต่ำสุดของมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร อย่างไรก็ตาม เมื่อนำดีเซลใช้งานจริงในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร ดีเซลสามารถใช้งานได้ดีและไม่พบปัญหาใดๆ ด้วยเหตุนี้จึงคาดว่า เชื้อเพลิงผสมทั้งหมดที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าความหนาแน่นต่ำสุดของมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร เชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรได้ดีเช่นเดียวกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงไม่เปรียบเทียบความหนาแน่นเชื้อเพลิงผสมกับความหนาแน่นต่ำสุดของมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร

ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในตารางที่ 4.9 กับมาตรฐานดีเซลทุกประเภทในตารางที่ 1.1 สรุปได้ดังนี้ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 80 60 และ 60 vol.% ตามลำดับ โดยที่เชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร สำหรับมาตรฐานดีเซลหมุนช้า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 80 vol.% เท่ากัน ส่วนมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว เมทิลเอสเตอรี น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 60 40 40 และ 20 vol.% ตามลำดับ

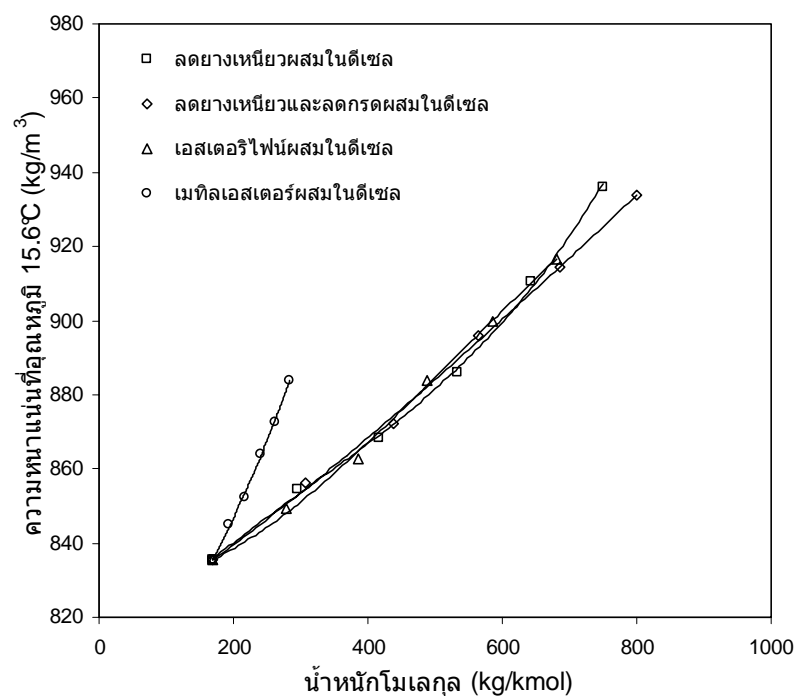
อย่างไรก็ตาม การสรุปสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด ของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ข้างต้น เป็นการสรุปตามผลการทดสอบเท่านั้น เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 4 ชนิดให้ผ่านมาตรฐานดีเซลเพิ่มขึ้น จึงนำผลการทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ สร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.4.3 ต่อไป

4.4.2 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

ถึงแม้การทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดจะให้ข้อสรุปที่ชัดเจน สามารถใช้เป็นข้อมูลสร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ตามที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.1

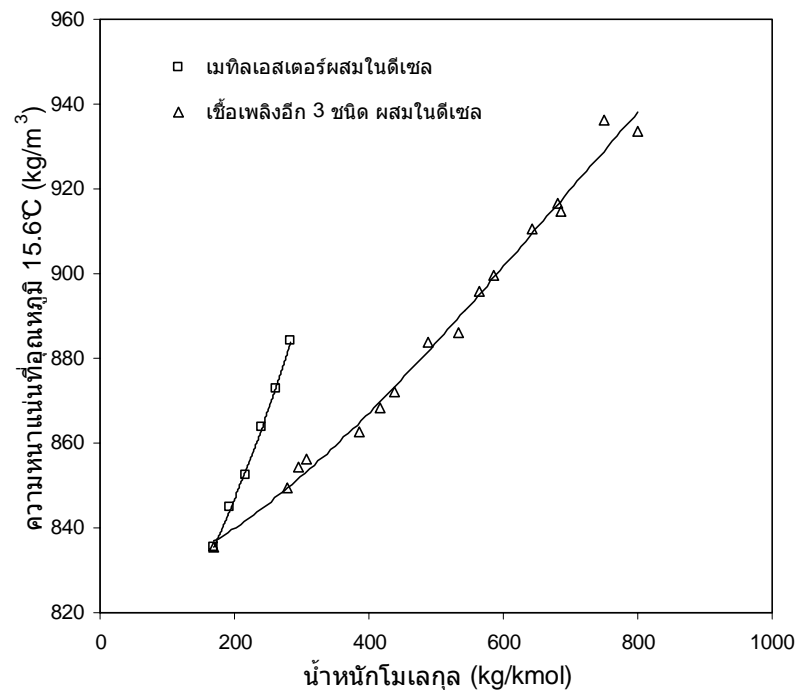
สำหรับความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดที่ทดสอบ การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ร่วมเฉพาะองค์ประกอบพื้นฐาน อาจได้ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์ และมีนัยสำคัญ สามารถบ่งบอกพฤติกรรมความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมได้ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเขียนกราฟความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสม เปรียบเทียบตัวแปรคุณลักษณะเชื้อเพลิงผสมรูปแบบต่างๆ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด (ตารางที่ 4.6) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่า ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย เมื่อพิจารณากราฟ พบว่า เชื้อเพลิงผสม 4 ชนิด มีพฤติกรรมพื้นฐานร่วมกัน ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล โดยน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ผสมในดีเซล ลักษณะกราฟมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างจากเมทิลเอสเทอร์อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาองค์ประกอบ (ตารางที่ 4.3) น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์ร่วมกัน โดยน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวมีกรดไขมันอิสระปนอยู่เล็กน้อย ขณะที่น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ก็มีเมทิลเอสเทอร์ปนอยู่เล็กน้อย เช่นเดียวกัน สำหรับเมทิลเอสเทอร์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99 wt.% ซึ่งแทบจะไม่มีองค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์เจือปนอยู่



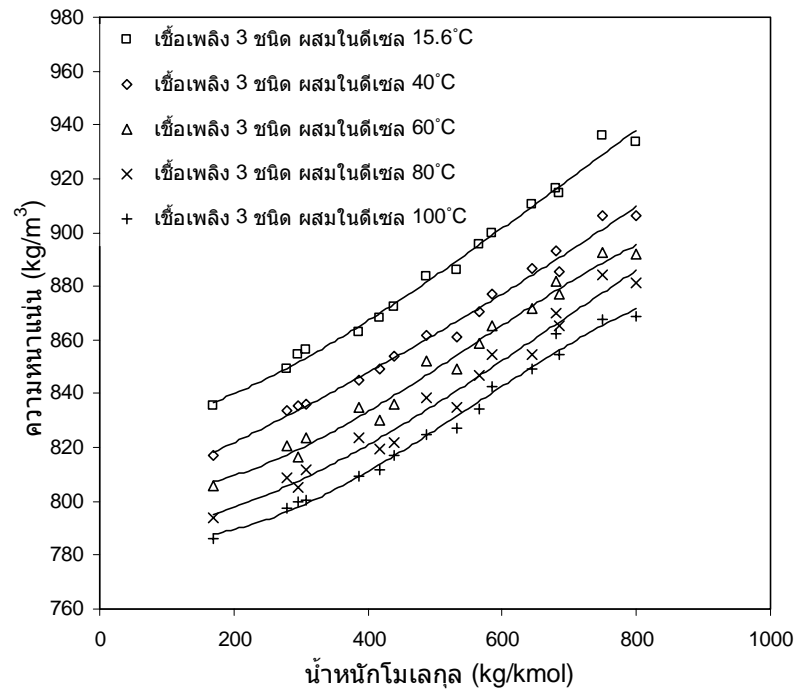
รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (เชื้อเพลิง 4 ชนิด)

อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบชนิดอื่นที่เจือปนอยู่เล็กน้อยในเชื้อเพลิงอาจส่งผลให้ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย เบียงเบนหรือคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่องค์ประกอบหลักหรือไตรกลีเซอไรด์ที่มีจำนวนมากกว่าจะส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมที่เปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงกว่า ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถรวม น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ ผสมในดีเซล ให้อยู่ในกราฟเส้นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.16 โดยกราฟที่ถูกรวมกันนี้ ยังเป็นใช้ประโยชน์สำหรับทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม แต่องค์ประกอบส่วนใหญ่ต้องเป็นไตรกลีเซอไรด์ และต้องรู้ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิง

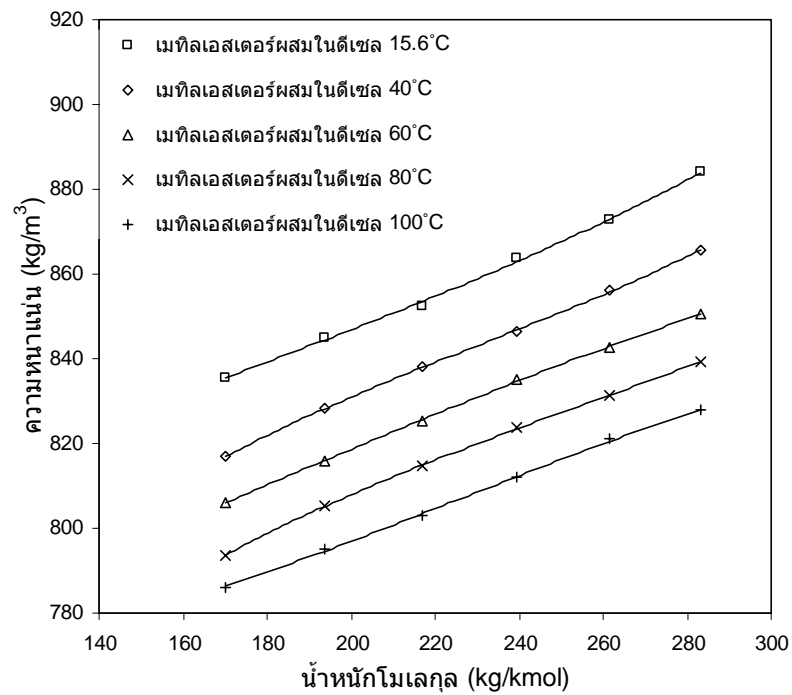


รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (เชื้อเพลิง 3 ชนิด และเมทิลเอสเตอรื)

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิจุดเดียวกันเท่านั้น เพื่อความเข้าใจที่มากขึ้นจึงเขียนกราฟที่อุณหภูมิต่างๆ เพิ่มเติม ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสม มีลักษณะเหมือนกันทุกช่วงอุณหภูมิ



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (เชื้อเพลิง 3 ชนิด)



รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (เมทิลเอสเตอ์)

โดยสรุปการพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสม ทำให้ทราบว่า เชื้อเพลิงผสม 4 ชนิด มีพฤติกรรมพื้นฐานร่วมกัน ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์ ดังนั้น การสร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.4.3 ถัดไป สามารถสร้างสมการร่วมกัน เพื่อความสะดวกสำหรับการใช้งาน ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซลที่ต้องสร้างสมการทำนายแยกเฉพาะ

4.4.3 สมการทำนายความหนาแน่น

4.4.3.1 สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมสามารถทำนายด้วยสมการที่ 4.41 (Alptekin and Canakci, 2008; Benjuea et al., 2008)

$$\rho = Ax + B \quad (4.41)$$

กำหนดให้

ρ คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของของเหลวผสม (kg/ลิตร)

x คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงในดีเซล (vol.%)

A และ B คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

พิจารณาสมการที่ 4.41 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสม มีสมการเป็นเส้นตรง ขึ้นกับสัดส่วนองค์ประกอบหรือของผสม สามารถจัดรูปสมการดังสมการที่ 4.42

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \quad (4.42)$$

กำหนดให้

ρ_m คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของของเหลวผสม (kg/ลิตร)

ρ_i คือ ความหนาแน่นของของเหลวแต่ละองค์ประกอบ i (kg/ลิตร)

V_i คือ สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบ i (deciliter)

จากสมการที่ 4.42 เปลี่ยนรูปสมการดังสมการที่ 4.43 ได้สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการที่ 4.43 ทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมในดีเซลที่อุณหภูมิมาตรฐาน 15.6°C

$$\rho_{B,15.6} = (1 - V_F) \rho_{D,15.6} + V_F \rho_{F,15.6} \quad (4.43)$$

กำหนดให้

$\rho_{B,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ 15.6°C (kg/□³)

$\rho_{D,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของดีเซลที่อุณหภูมิ 15.6°C (kg/□³)

$\rho_{F,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมที่อุณหภูมิ 15.6°C (kg/□³)

V_F คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเชื้อเพลิงในดีเซล (decil) □

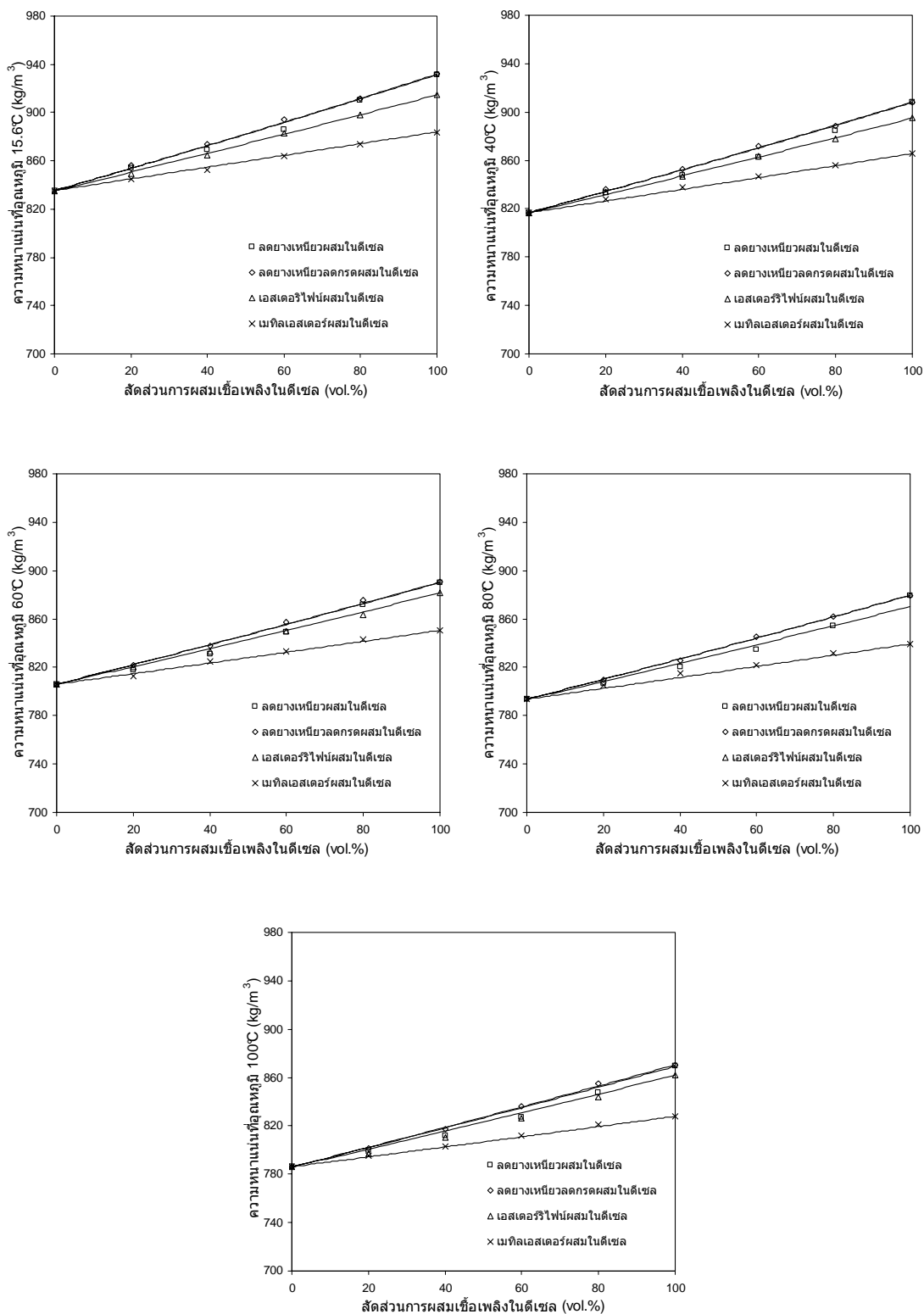
ถึงแม้ว่าการพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสม (หัวข้อที่ 4.4.2) ทำให้ทราบว่า เชื้อเพลิงผสมทั้ง 4 ชนิด มีพฤติกรรมพื้นฐานร่วมกัน ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล แต่การทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดผสมในดีเซล ก็สามารถใช้สมการทำนายเดียวกันได้ เนื่องจาก สมการที่ 4.43 สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมไม่มีตัวแปรที่พิจารณาเชื้อเพลิงผสม 4 ชนิดร่วมกัน

ผลการทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ผสมในดีเซล ที่อุณหภูมิ 15.6 40 60 80 และ 100°C ตามลำดับ ด้วยสมการที่ 4.43 ได้ผลดังรูปที่ 4.19 เมื่อวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ด้วยสมการที่ 3.1 การทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ 15.6 40 60 80 และ 100°C ตามลำดับ มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.39%

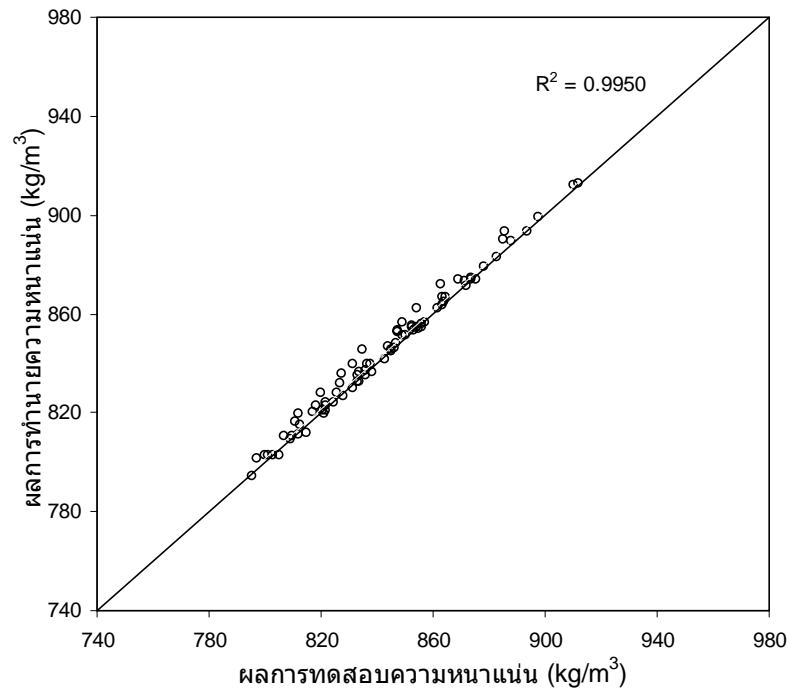
เมื่อเขียนกราฟผลการทดสอบความหนาแน่นเปรียบเทียบกับผลการทำนายความหนาแน่นด้วยสมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม ของเชื้อเพลิงผสม ดังรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า ค่า R² สูงกว่า 0.95 (สมการที่ 3.2) ดังนั้น สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสม สามารถทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ และยอมรับได้ในทางสถิติวิศวกรรม

4.4.3.2 สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ

ปริมาตรของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สามารถทำนายด้วยสมการที่ 4.44 (Perry et al., 1998)



รูปที่ 4.19 ความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่างๆ (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)



รูปที่ 4.20 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสม
(ฟังก์ชันสัดส่วนการผสม)

$$V_T = V_o(D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4) \quad (4.44)$$

$$\frac{V_T}{V_o} = (D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4) \quad (4.45)$$

กำหนดให้

V_T คือ ปริมาตรของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (m^3)

V_o คือ ปริมาตรของเหลวที่อุณหภูมิอ้างอิง (m^3)

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

D_1 D_2 D_3 และ D_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

โดยทั่วไปความหนาแน่นเท่ากับมวลหารด้วยปริมาตร ดังสมการที่ 4.46 สมมุติให้มวลสารไม่เปลี่ยนแปลงหรือเป็นค่าคงที่ เมื่ออุณหภูมิสารเพิ่มสูงขึ้น ปริมาตรสารจะขยายตัว เป็นผลให้ความหนาแน่นสารลดลง ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.46 จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงเปลี่ยนรูปสมการที่ 4.45 เป็นสมการที่ 4.47

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4.46)$$

$$\frac{\rho_T}{\rho_o} = (D_1 T^3 + D_2 T^2 + D_3 T + D_4) \quad (4.47)$$

กำหนดให้

- ρ คือ ความหนาแน่น (kg/□)
- ρ_T คือ ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (kg/□)
- ρ_o คือ ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิอ้างอิง (kg/□)
- m คือ มวล (kg)
- T คือ อุณหภูมิ (°C)
- v คือ ปริมาตร (□)
- D_1 D_2 D_3 และ D_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

จากสมการที่ 4.47 เมื่อนำความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C หารด้วยความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอ้างอิงที่อุณหภูมิ 15.6°C จากนั้นนำผลหารที่ได้พล็อตกราฟกับอุณหภูมิ 15.6-100°C พบว่า สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ D_1 D_2 D_3 และ D_4 ของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดมีค่าน้อยมากและใกล้เคียงกัน เพื่อความสะดวกในการสร้างสมการทำนาย และการนำสมการทำนายอย่างง่ายไปใช้งาน จึงนำสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ D_1 D_2 D_3 และ D_4 ของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดหาค่าเฉลี่ย ยกเว้นกรณีเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล ที่ต้องแยกคิดสัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะ เนื่องจากเมทิลเอสเทอร์ ไม่มีพฤติกรรมพื้นฐานร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ดังที่กล่าวในการพิจารณาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสม (หัวข้อที่ 4.4.2)

สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ค่าคงที่เฉพาะ D_1 D_2 D_3 และ D_4 ของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด ที่ได้จาก น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์โพลีผสมในดีเซล มีค่าดังนี้

$$D_1 = 8.65628 \times 10^{-9}$$

$$D_2 = 2.19015 \times 10^{-6}$$

$$D_3 = -1.10872 \times 10^{-3}$$

$$D_4 = 1.01670$$

สำหรับกรณี เมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล มีสัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะ ดังนี้

$$D_1 = 3.08034 \times 10^{-9}$$

$$D_2 = 1.57309 \times 10^{-6}$$

$$D_3 = -9.27871 \times 10^{-4}$$

$$D_4 = 1.01414$$

ขั้นตอนต่อไป จัดรูปสมการที่ 4.47 ดังสมการที่ 4.48 จะได้สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการที่ 4.48 ทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บวมผสมในดีเซล ในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C

$$\rho_T = \rho_o (D_1 T^3 + D_2 T^2 + D_3 T + D_4) \quad (4.48)$$

กำหนดให้

ρ_T คือ ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (kg/m^3)

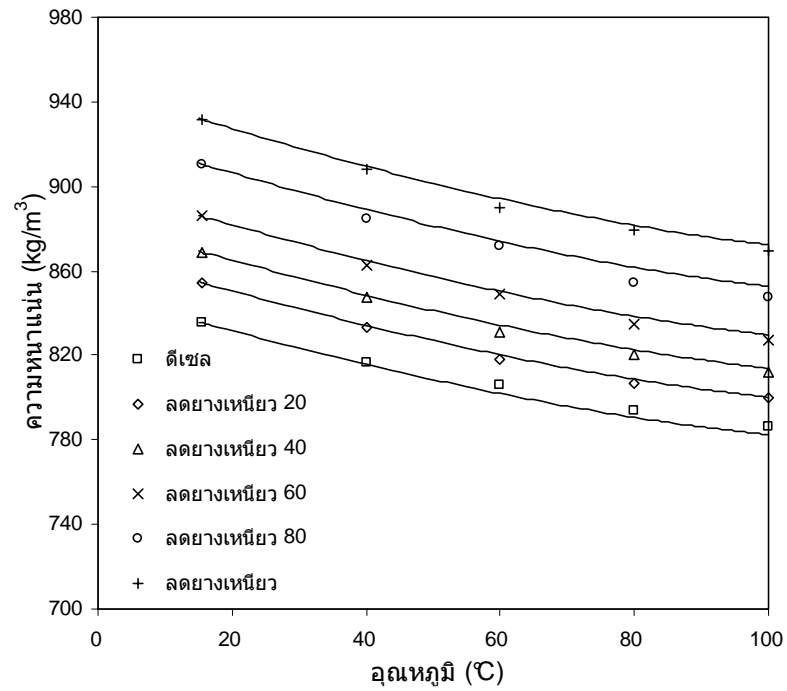
ρ_o คือ ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิอ้างอิง กำหนดที่ 15.6°C (kg/m^3)

T คือ อุณหภูมิในช่วง 15.6-100°C

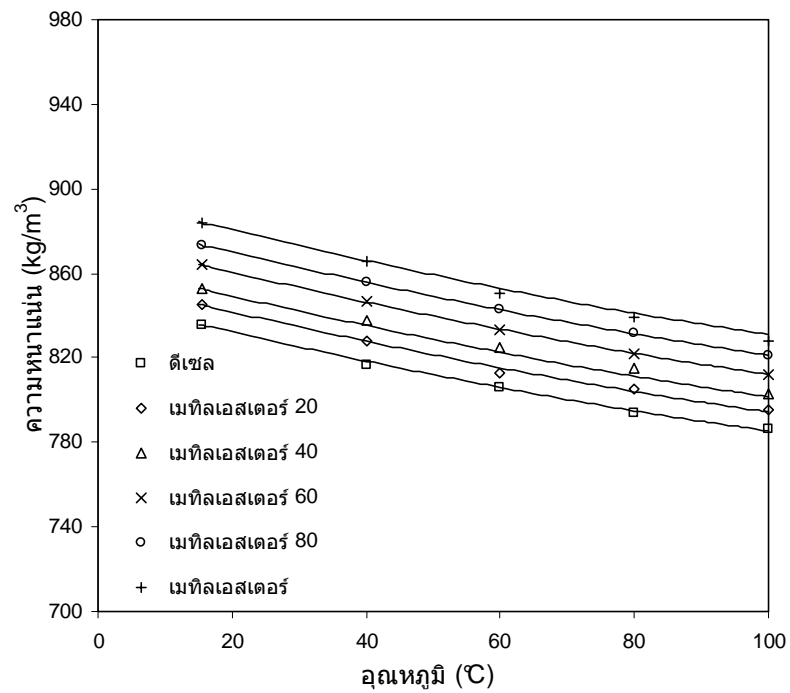
D_1 D_2 D_3 และ D_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

นำสมการที่ 4.48 ทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บวมผสมในดีเซล ช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C โดยแสดงผลการทำนายเฉพาะน้ำมันปาล์มดิบที่บวมผสมในดีเซล และเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 เมื่อวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ ด้วยสมการที่ 3.1 การทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บวมผสมในดีเซล ในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.24% สำหรับเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และ 0.11% สำหรับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล

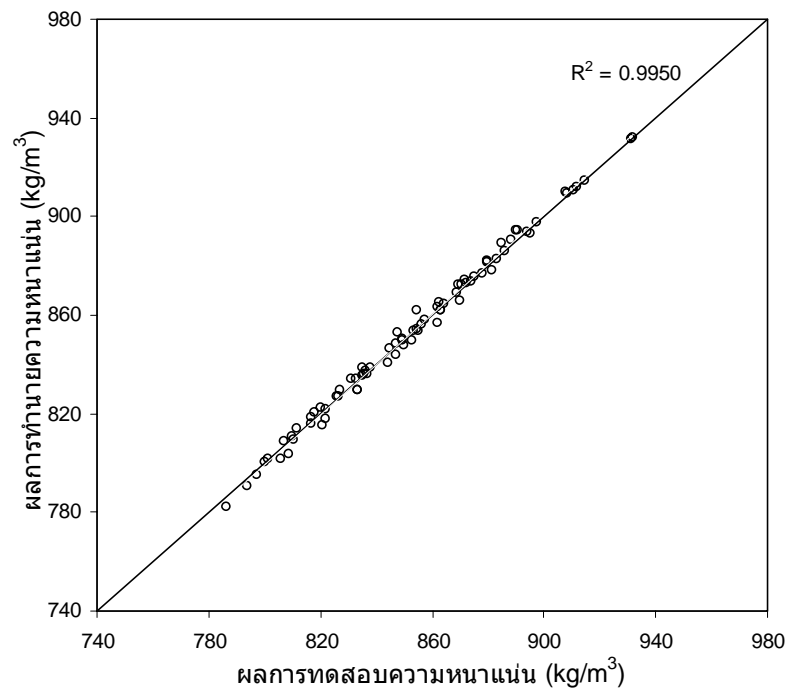
เมื่อเขียนกราฟผลการทดสอบความหนาแน่นเปรียบเทียบกับผลการทำนายความหนาแน่นด้วยสมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ ของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่า ค่า R^2 สูงกว่า 0.95 ทั้งหมด (สมการที่ 3.2) ดังนั้น สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิสามารถทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ และยอมรับได้ในทางสถิติวิศวกรรม



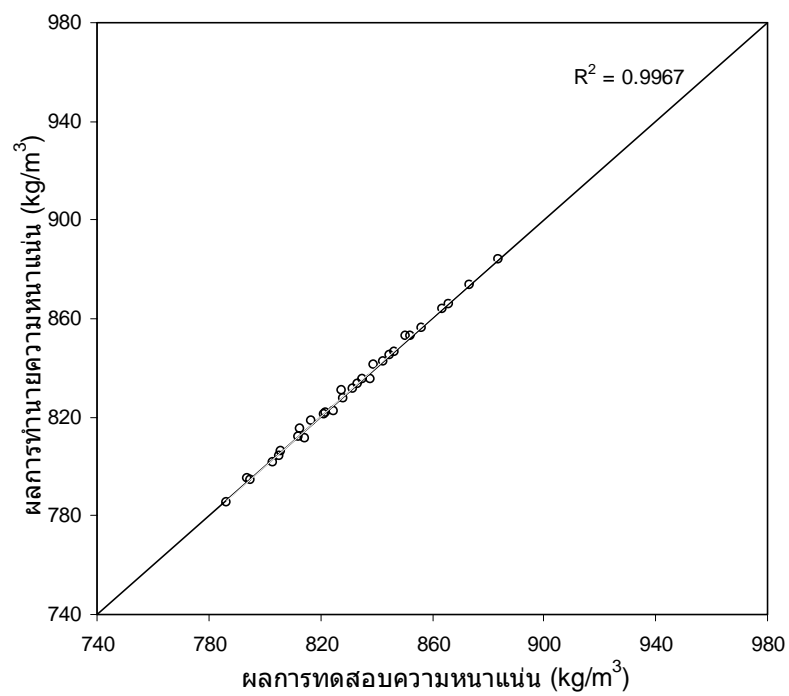
รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.22 ความหนาแน่นของเมทิลเอสเตอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.23 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่น
ของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด (ฟังก์ชันอุณหภูมิต่ำ)



รูปที่ 4.24 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่น
ของเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันอุณหภูมิต่ำ)

4.4.3.3 สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ

พิจารณาสมการที่ 4.48 แทน $\rho_{B,15.6}$ (สมการที่ 4.43) ใน ρ_o เนื่องจากต้องการให้ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิ 15.6°C เป็นจุดอ้างอิง ดังสมการที่ 4.49 และ 4.50 ซึ่งจะได้สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ

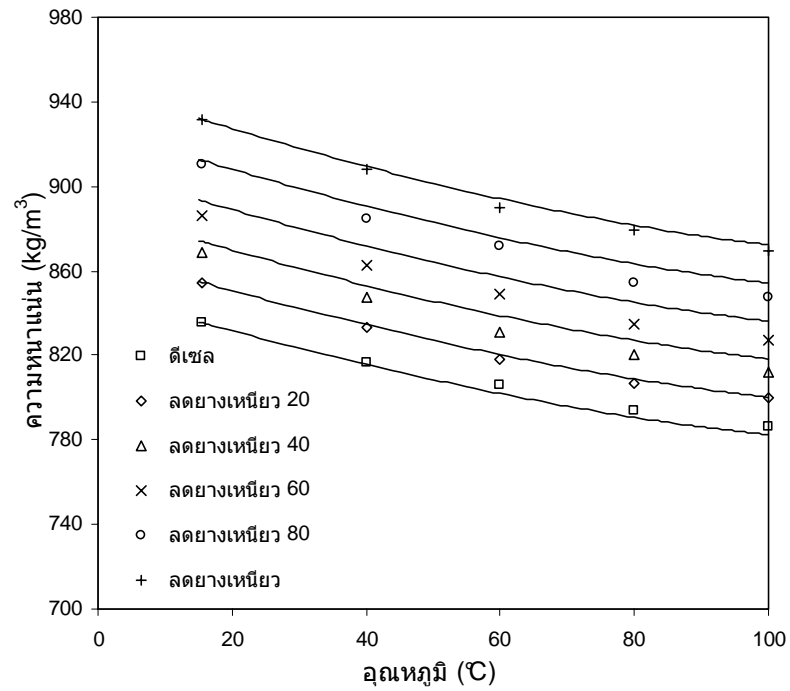
$$\rho_T = \rho_{B,15.6}(D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4) \quad (4.49)$$

$$\rho_T = ((1 - V_F)\rho_{D,15.6} + V_F\rho_{F,15.6})(D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4) \quad (4.50)$$

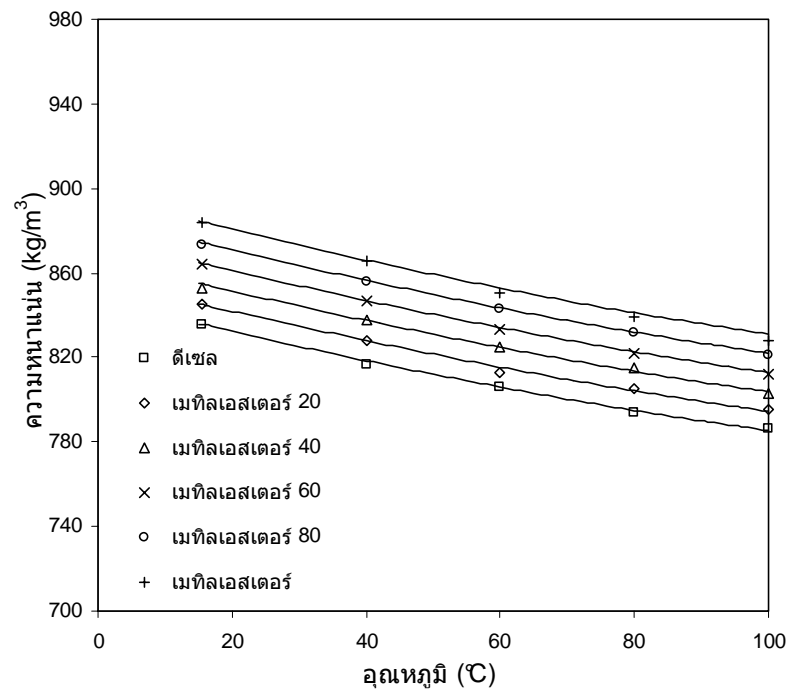
กำหนดให้

- ρ_T คือ ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (kg/ลิตร)
- $\rho_{B,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/ลิตร)
- $\rho_{D,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของดีเซลที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/ลิตร)
- $\rho_{F,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/ลิตร)
- T คือ อุณหภูมิในช่วง 15.6-100°C
- V_F คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเชื้อเพลิงในดีเซล (deciliter)
- D_1, D_2, D_3 และ D_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

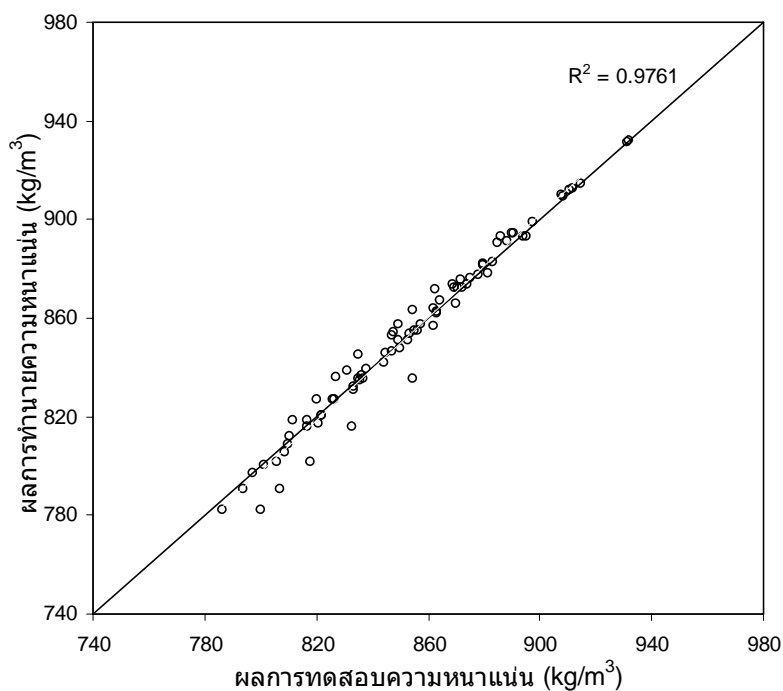
ผลการทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ที่สัดส่วนต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C ด้วยสมการที่ 4.50 สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ โดยแสดงผลการทำนายเฉพาะน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวผสมในดีเซล และเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 เมื่อวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ด้วยสมการที่ 3.1 การทำนายความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ผสมในดีเซล ที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.42% สำหรับเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และ 0.11% สำหรับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล เมื่อเขียนกราฟผลการทดสอบความหนาแน่นเปรียบเทียบกับผลการทำนายความหนาแน่นด้วยสมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่า ค่า R^2 สูงกว่า 0.95 (สมการที่ 3.2) ดังนั้น สมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิจึงสามารถทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ และยอมรับได้ในทางสถิติวิศวกรรม



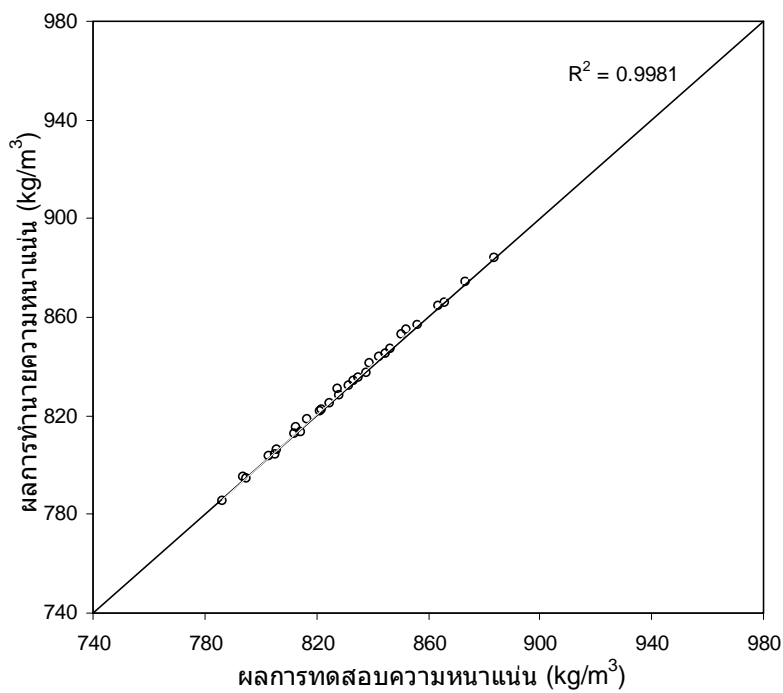
รูปที่ 4.25 ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มคิบบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.26 ความหนาแน่นของเมทิลเอสเตอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.27 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.28 ผลการทำนายความหนาแน่นต่อผลการทดสอบความหนาแน่นของเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล (ฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)

4.4.3.4 สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบ หีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ

กำหนดให้

$\rho_{St,15.6}$ คือ ความหนาแน่นสูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน สำหรับดีเซลเครื่องยนต์
การเกษตร 900 kg/□ สำหรับดีเซลหมุนช้า 920 kg/□ ส่วนดีเซล
หมุนเร็ว 870 kg/□

$V_{F \max}$ คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซล
สูงสุด (vol.%)

จากสมการที่ 4.43 แทน $\rho_{St,15.6}$ ใน $\rho_{D,15.6}$ และแทน $V_{F \max}$ ใน v_F ดังสมการที่ 4.51

$$\rho_{St,15.6} = (1 - V_{F \max})\rho_{D,15.6} + V_{F \max}\rho_{F,15.6} \quad (4.51)$$

$$\rho_{St,15.6} = \rho_{D,15.6} - V_{F \max}\rho_{D,15.6} + V_{F \max}\rho_{F,15.6} \quad (4.52)$$

$$\rho_{St,15.6} - \rho_{D,15.6} = V_{F \max}(\rho_{F,15.6} - \rho_{D,15.6}) \quad (4.53)$$

จัดรูปสมการที่ 4.53 ดังสมการที่ 4.54 ได้สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของ
เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซล
ประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 15.6°C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสม

$$V_{F \max} = \frac{\rho_{St,15.6} - \rho_{D,15.6}}{\rho_{F,15.6} - \rho_{D,15.6}} \quad (4.54)$$

กำหนดให้

$V_{F \max}$ คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซล
สูงสุด (vol.%)

$\rho_{D,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของดีเซลที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/□)

$\rho_{F,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่
อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/□)

$\rho_{St,15.6}$ คือ ความหนาแน่นสูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน สำหรับดีเซลเครื่องยนต์
การเกษตร 900 kg/□ สำหรับดีเซลหมุนช้า 920 kg/□ ส่วนดีเซล
หมุนเร็ว 870 kg/□

จัดรูปสมการที่ 4.53 ดังสมการที่ 4.54 ได้สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของ
เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซล
ประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 15.6°C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสม

$$V_{F \max} = \frac{\rho_{St,15.6} - \rho_{D,15.6}}{\rho_{F,15.6} - \rho_{D,15.6}} \quad (4.54)$$

กำหนดให้

$V_{F \max}$ คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซล
สูงสุด (vol.%)

$\rho_{D,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของดีเซลที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/□)

$\rho_{F,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่
อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/□)

$\rho_{St,15.6}$ คือ ความหนาแน่นสูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน สำหรับดีเซลเครื่องยนต์
การเกษตร 900 kg/□ สำหรับดีเซลหมุนช้า 920 kg/□ ส่วนดีเซล
หมุนเร็ว 870 kg/□

จากสมการที่ 4.50 แทน $\rho_{St,15.6}$ ใน ρ_T และแทน $V_{F \max}$ ใน v_F ดังสมการที่ 4.55

$$\rho_{St,15.6} = ((1 - V_{F \max})\rho_{D,15.6} + V_{F \max}\rho_{F,15.6})(D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4) \quad (4.55)$$

จากสมการที่ 4.55 กำหนดให้ $U = D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4$ ดังสมการที่ 4.56

$$\rho_{St,15.6} = U((1 - V_{F \max})\rho_{D,15.6} + V_{F \max}\rho_{F,15.6}) \quad (4.56)$$

$$\rho_{St,15.6} = U((1 - V_{F \max})\rho_{D,15.6} + V_{F \max}\rho_{F,15.6}) \quad (4.57)$$

$$\rho_{St,15.6} = U\rho_{D,15.6} - UV_{F \max}\rho_{D,15.6} + UV_{F \max}\rho_{F,15.6} \quad (4.58)$$

$$\rho_{St,15.6} = U\rho_{D,15.6} + V_{F \max}(U\rho_{F,15.6} - U\rho_{D,15.6}) \quad (4.59)$$

$$\rho_{St,15.6} - U\rho_{D,15.6} = V_{F \max} (U\rho_{F,15.6} - U\rho_{D,15.6}) \quad (4.60)$$

$$V_{F \max} = \frac{\rho_{St,15.6} - U\rho_{D,15.6}}{U\rho_{F,15.6} - U\rho_{D,15.6}} \quad (4.61)$$

$$V_{F \max} = \frac{\rho_{St,15.6} - U\rho_{D,15.6}}{U(\rho_{F,15.6} - \rho_{D,15.6})} \quad (4.62)$$

จากสมการที่ 4.62 แทน $U = D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4$ ลงในสมการ ได้สมการที่ 4.63 สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ

$$V_{F \max} = \frac{\rho_{St,15.6} - (\rho_{D,15.6})(D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4)}{(\rho_{F,15.6} - \rho_{D,15.6})(D_1T^3 + D_2T^2 + D_3T + D_4)} \quad (4.63)$$

กำหนดให้

$V_{F \max}$ คือ สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลสูงสุด (vol.%)

$\rho_{D,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของดีเซลที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/□)

$\rho_{F,15.6}$ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C (kg/□)

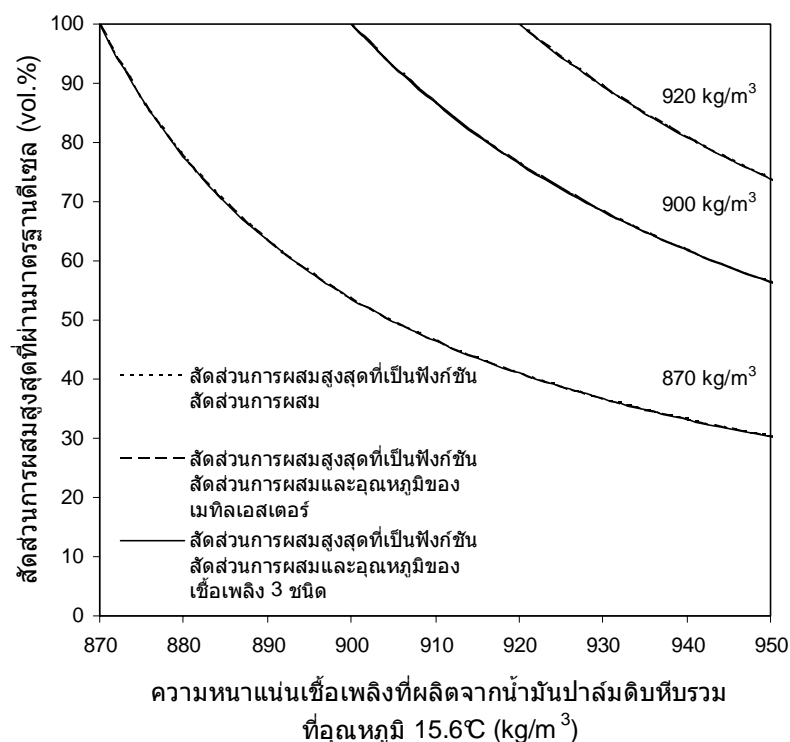
$\rho_{St,15.6}$ คือ ความหนาแน่นสูงสุดที่ผ่านมาตรฐาน สำหรับดีเซลเครื่องยนต์ การเกษตร 900 kg/□ สำหรับดีเซลหมุนช้า 920 kg/□ ส่วนดีเซลหมุนเร็ว 870 kg/□

T คือ อุณหภูมิในช่วง 15.6-100°C

D_1 D_2 D_3 และ D_4 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่

ผลการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ด้วยสมการทำนายที่ 4.63 (สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ)

สำหรับขั้นตอนการสร้างสมการนี้ ได้นำความหนาแน่นเชื้อเพลิงผสม 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม วิเคราะห์พฤติกรรมพื้นฐานด้วยการพล็อตกราฟกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย สรุปได้ว่า เชื้อเพลิงผสม 4 ชนิด มีพฤติกรรมร่วมกัน ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล (หัวข้อ 4.4.2) ดังนั้น การทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ด้วยสมการที่ 4.63 จึงแยกพิจารณาเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด กับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล นอกจากนี้ยังใช้ สมการที่ 4.54 (สมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 15.6°C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสม) ทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 15.6°C เพิ่มเติม ได้ผลดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การทำนายด้วยสมการที่ 4.63 ที่แยกพิจารณาเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด กับเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล และการทำนายด้วยสมการที่ 4.54 กราฟมีลักษณะทับกันทุกช่วงการทำนาย



รูปที่ 4.29 สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ

เมื่อพิจารณา การทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทดสอบที่อุณหภูมิอ้างอิง 15.6°C ตามมาตรฐานดีเซล ในทางปฏิบัติ พบว่า มีปัญหาการทดสอบค่อนข้างมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เริ่มเปลี่ยนเป็นสีขุ่น มีแนวโน้มน้ำที่จะเป็นไข มีความหนืดสูง มีสภาพเหนียวข้น และไหลช้า เมื่อพิจารณาการทดสอบความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 40°C พบว่าเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม มีลักษณะเป็นของเหลวใสทั้งหมด ไม่มีสีขุ่นเกิดขึ้น ลักษณะเชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถทดสอบได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงสร้างสมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิ โดยใช้ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 40°C เป็นความหนาแน่นอ้างอิง ซึ่งขั้นตอนการสร้างสมการนี้เหมือนกับขั้นตอนการสร้างสมการที่ 4.50

สำหรับสมการทำนายความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนการผสมและอุณหภูมิที่อุณหภูมิอ้างอิง 40°C สัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉลี่ย D_1 D_2 D_3 และ D_4 ของเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิดที่ได้จาก น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ ผสมในดีเซล มีค่า ดังนี้

$$D_1 = 8.87593 \times 10^{-9}$$

$$D_2 = 2.24450 \times 10^{-6}$$

$$D_3 = -1.13598 \times 10^{-3}$$

$$D_4 = 1.04142$$

ส่วนสัมประสิทธิ์ค่าคงที่เฉพาะของเมทิลเอสเตอรีผสมในดีเซล ที่อุณหภูมิอ้างอิง 40°C แสดงค่า ดังนี้

$$D_1 = 3.14508 \times 10^{-9}$$

$$D_2 = 1.60573 \times 10^{-6}$$

$$D_3 = -9.46857 \times 10^{-4}$$

$$D_4 = 1.03478$$

เมื่อวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ด้วยสมการที่ 3.1 การทำนายความหนาแน่นเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ผสมในดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.38% สำหรับเชื้อเพลิงผสม 3 ชนิด และ 0.14% สำหรับเมทิลเอสเตอรีผสมในดีเซล

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด ด้วยสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ สามารถสรุปสัดส่วนการผสมสูงสุดในดีเซลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C โดยที่ความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย

ชนิดเชื้อเพลิง	สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลในดีเซลสูงสุด (vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานประเภทต่างๆ									
	ดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร			ดีเซลหมุนช้า		ดีเซลหมุนเร็ว				
	อุณหภูมิ (°C)			อุณหภูมิ (°C)		อุณหภูมิ (°C)				
	15.6	30	40	15.6	30	15.6	30	40	50	60
1. น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียว	67	94	100	89	100	36	57	75	96	100
2. น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ลดยางเหนียวและลดกรด	67	94	100	89	100	36	57	75	96	100
3. น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เอสเตอรีไฟน์	78	100	100	100	100	42	71	96	100	100
4. เมทิลเอสเตอรี	100	100	100	100	100	71	100	100	100	100

จากตารางที่ 4.10 สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 15.6°C น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 78 67 และ 67 vol.% ตามลำดับ โดยที่เชื้อเพลิงผสมทั้งหมดผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร สำหรับมาตรฐานดีเซลหมุนช้า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 89 vol.% เท่ากัน ส่วนมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว เมทิลเอสเตอรี น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 71 42 36 และ 36 vol.% ตามลำดับ

4.5 การไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล

4.5.1 ผลการทดลองปริมาณไขของเชื้อเพลิงผสม

สำหรับระยะเวลาศึกษาพฤติกรรมการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม ตอนเริ่มต้นได้ศึกษาการอ่านค่าไขที่เกิดขึ้นทุกวัน เป็นเวลา 30 วัน และได้วางเชื้อเพลิงสังเกตการเป็นไขระยะยาว 90 วัน ผลการศึกษาขั้นต้นพบว่า ลักษณะทั่วไปของการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม ระยะแรกเชื้อเพลิงเหลวจะเปลี่ยนเป็นสีขุ่น เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการจับตัวเป็นก้อนไขเล็กๆ ในเชื้อเพลิงเหลว เมื่อก่อนไขโตขึ้นและมีน้ำหนักมากพอ ก้อนไขจะตกลงด้านล่างของกระบอกตวง แต่ยังมีก้อนไขอีกเล็กน้อยที่เกาะอยู่ข้างกระบอกตวง ในช่วง 1-2 วันแรก ไขที่ตกลงด้านล่างมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเริ่มคงตัวในช่วง 7-14 วัน สำหรับเชื้อเพลิงส่วนของเหลวจะมีความใสเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ตั้งไว้ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณไขที่เกิดขึ้นเมื่อวางเชื้อเพลิง 90 วัน มีค่าไม่แตกต่างจากปริมาณไขที่อ่านได้เมื่อวางเชื้อเพลิง 14 วัน ในที่นี้สรุปได้ว่า ระยะเวลา 14 วัน เพียงพอสำหรับศึกษาพฤติกรรมการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม อย่างไรก็ตาม การทดลองแต่ละวันควรเคาะและหมุนกระบอกตวงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้ไขที่เกิดขึ้นไม่ติดอยู่ตามผนังกระบอกตวง และช่วยแยกก้อนไขออกจากเชื้อเพลิงส่วนของเหลวได้มากขึ้น

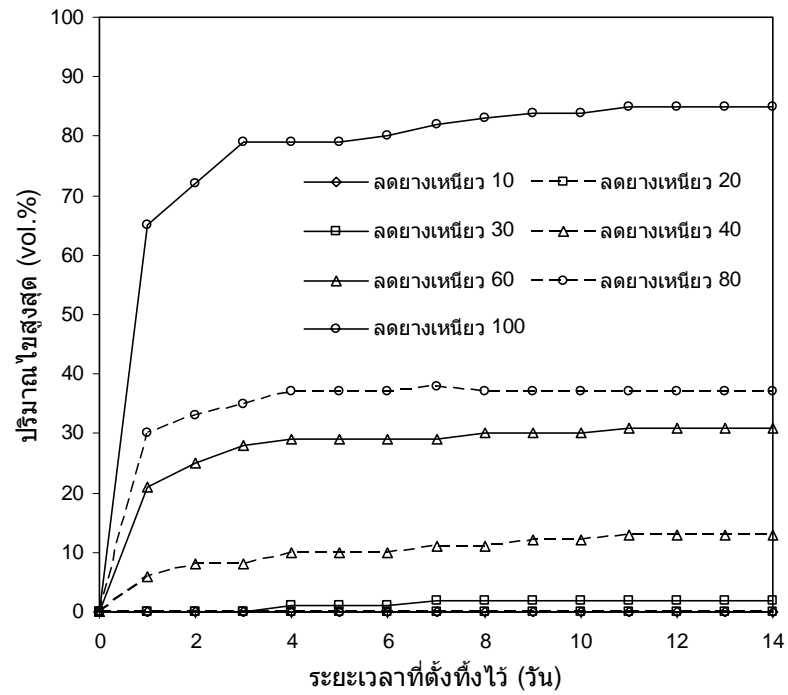
การศึกษากการเป็นไขของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ผสมในดีเซล กรณีที่เชื้อเพลิงผสมไม่เป็นไข การสังเกตผลการทดลองสามารถกระทำได้อย่างแม่นยำ แต่สำหรับกรณีที่เชื้อเพลิงผสมเป็นไข ถึงแม้ว่ามีการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบและกระบวนการผลิตเหมือนกันทุกครั้งที่ในการผลิตเชื้อเพลิงผสม (ดังตารางที่ 3.1) อย่างไรก็ตาม บนพื้นฐานขีดจำกัดของวิธีการทดลอง หรืออาจจะมีผลกระทบของพฤติกรรมบางอย่างที่ยังไม่เข้าใจและไม่ได้ถูกควบคุมในการศึกษานี้ จากผลการทดลอง 3 ครั้ง พบว่า ปริมาณไขที่สภาวะคงตัวของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ยังมีค่าแตกต่างกันในช่วง 70-85 85-95 และ 30-32 vol.% ตามลำดับ โดยความแตกต่างเหล่านี้จะมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในดีเซลลดลง

ถึงแม้ว่าผลการวัดปริมาณไขของเชื้อเพลิงผสม จะได้ข้อมูลเป็นช่วง ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด อย่างไรก็ตาม ค่าสูงสุดของปริมาณไขที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกกรณีร้ายแรงมากที่สุดสำหรับการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมที่เกิดขึ้น ซึ่งควรใช้เป็นเงื่อนไขพิจารณาสำหรับการพัฒนาเชื้อเพลิงเหลวที่ไม่เป็นไขมากกว่าค่าเฉลี่ย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกรายงานค่าสูงสุด ของผลการวัดปริมาณไขของเชื้อเพลิงผสม เมื่อวางในบรรยากาศปกติเป็นเวลา 1-14 วัน ดังตารางที่ 4.11

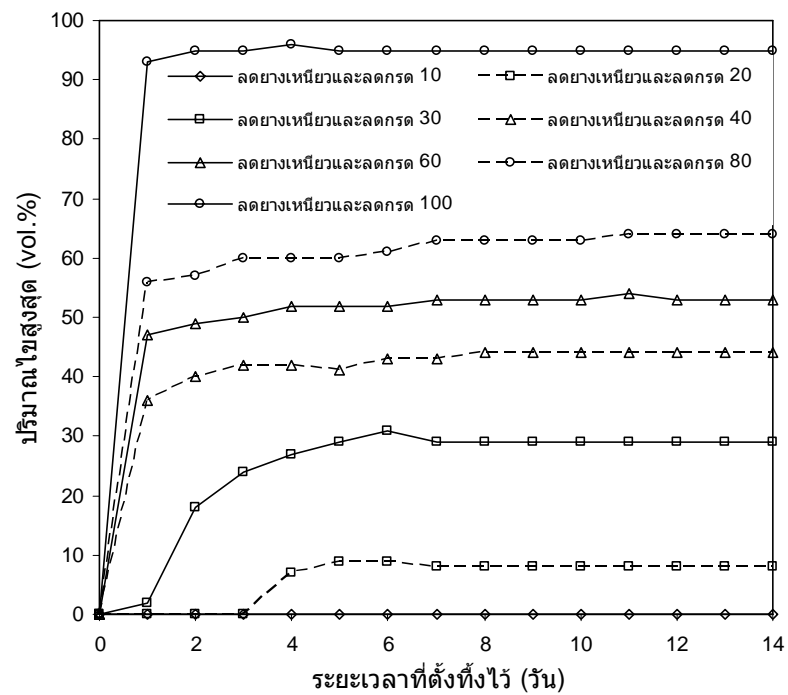
ตารางที่ 4.11 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงผสมเมื่อวางไว้ในบรรยากาศ 1-14 วัน (vol.%)

เชื้อเพลิง	ระยะเวลา (วัน)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 30	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 40	6	8	8	10	10	10	11	11	12	12	13	13	13	13
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 60	21	25	28	29	29	29	29	30	30	30	31	31	31	31
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 80	30	33	35	37	37	37	38	37	37	37	37	37	37	37
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว 100	65	72	79	79	79	80	82	83	84	84	85	85	85	85
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 20	0	0	0	7	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 30	2	13	18	23	27	31	29	29	29	29	29	29	29	29
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 40	36	40	42	42	41	43	43	44	44	44	44	44	44	44
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 60	47	49	50	52	52	52	53	53	53	53	54	53	53	53
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 80	56	57	60	60	60	61	63	63	63	63	64	64	64	64
ปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด 100	93	95	95	96	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 40	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 60	9	13	14	15	15	16	18	19	19	19	19	19	21	20
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 80	15	19	22	22	23	23	23	24	24	24	24	24	24	24
ปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ 100	24	29	29	30	30	30	31	32	31	31	32	32	32	32
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
เมทิลเอสเตอร์จากปาล์มดิบหีบรวม 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

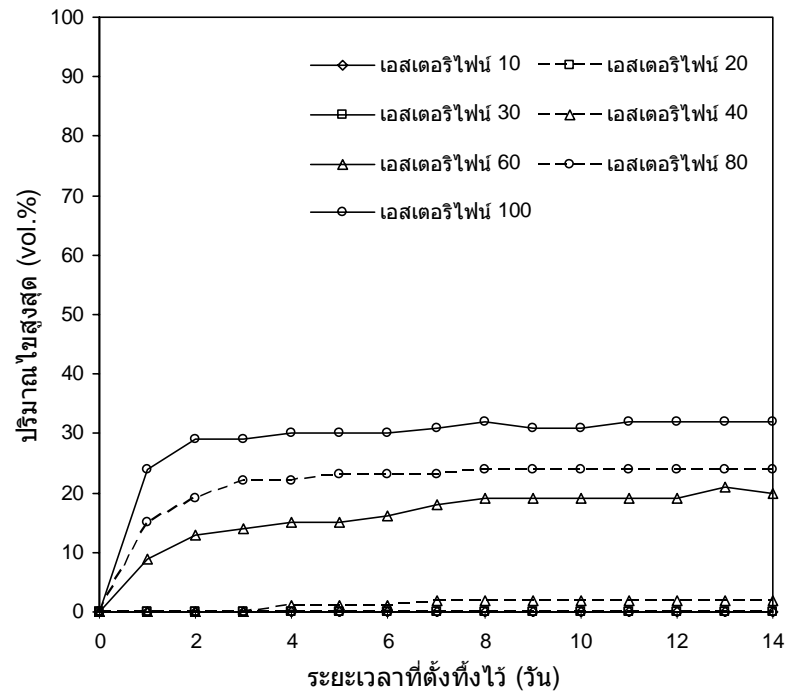
สำหรับเชื้อเพลิงผสมของ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวในดีเซล น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดในดีเซล และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ในดีเซล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรคาร์บอนกับระยะเวลา จะได้กราฟผลการทดลองดังรูปที่ 4.30-4.32 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในช่วง 7-14 วัน ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ภาวะคงตัว (วันที่ 14) กับสัดส่วนการผสมในดีเซลของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด จะได้กราฟผลการทดลองดังรูปที่ 4.33



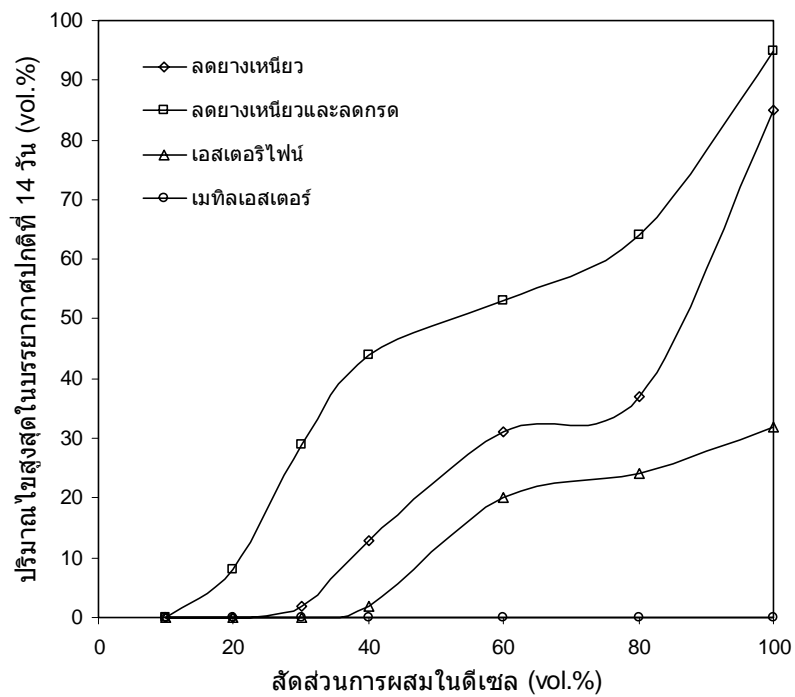
รูปที่ 4.30 ปริมาณไขสูงสุดของน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล (1-14 วัน)



รูปที่ 4.31 ปริมาณไขสูงสุดของน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล (1-14 วัน)



รูปที่ 4.32 ปริมาณไขสูงสุดของน้ำมันปาล์มดิบที่บ่มรวมเอสเตอรีไฟน์ผสมในดีเซล (1-14 วัน)



รูปที่ 4.33 ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสม ณ วันที่ 14

สำหรับวัตถุประสงค์ที่ต้องการทราบ สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่เชื้อเพลิงผสมต้องไม่เป็นไข ผลการทดลองในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.33 ให้ข้อสรุปที่ชัดเจน ดังนี้ เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซลได้ทุกสัดส่วนการผสม (0-100 vol.%) สำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด ผสมในดีเซลสูงสุด 30 20 และ 10 vol.% เรียงจากมากไปน้อย ตามลำดับ

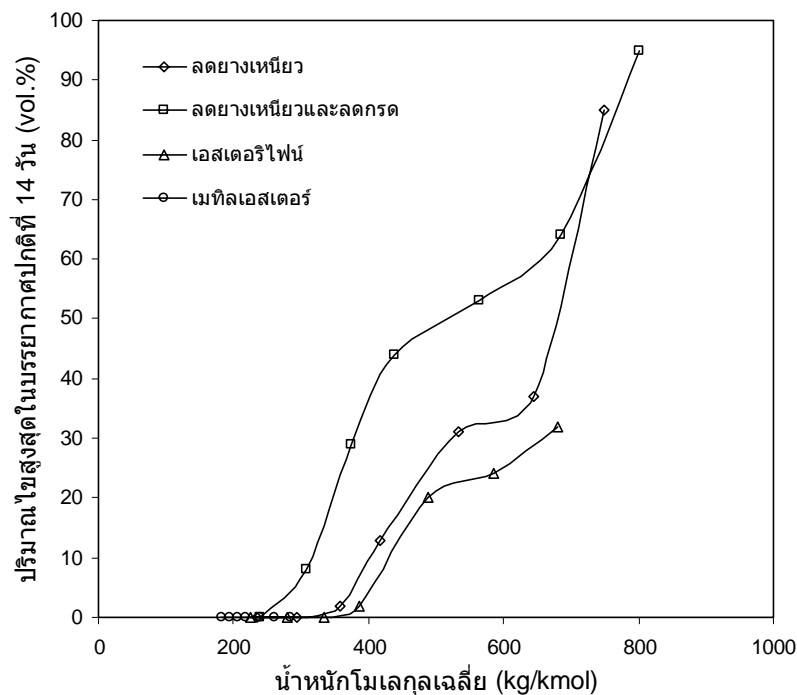
4.5.2 การไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล

ถึงแม้ว่าผลการทดลอง จะได้ข้อสรุปเชิงประจักษ์ สำหรับสัดส่วนการผสมในดีเซลที่ไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.5.1 สำหรับเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด การวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ร่วมของการไม่เป็นไข ในเทอมของตัวแปรองค์ประกอบพื้นฐานของเชื้อเพลิง อาจจะได้ข้อสรุปมูลฐานที่มีประโยชน์ และมีนัยสำคัญต่อการเข้าใจพฤติกรรมการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงผสมได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงลงเขียนกราฟปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมเมื่อวางในบรรยากาศ 14 วัน ให้อยู่ในเทอมของตัวแปรบ่งบอกคุณลักษณะของเชื้อเพลิงผสมรูปแบบต่างๆ ที่น่าสนใจ เพื่อหาจุดแนวโน้มเริ่มเป็นไขร่วมกันของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไขสูงสุดกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงผสม ดังรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงผสมแต่ละชนิดมีองค์ประกอบแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.3) มีแนวโน้มเริ่มเป็นไขขณะที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยไม่เท่ากัน โดยน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ผสมในดีเซล มีแนวโน้มเริ่มเป็นไขที่น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงขึ้นตามลำดับ ส่วนเมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล ไม่เป็นไขทุกน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ข้อค้นพบนี้บ่งชี้ให้ทราบว่า จุดแนวโน้มเริ่มเป็นไขร่วมกันของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด ไม่สามารถจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์พื้นฐานร่วมที่ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว แต่อย่างน้อยต้องขึ้นกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม

จากผลการวัดปริมาณไขของเชื้อเพลิงผสม (รูปที่ 4.33) และข้อมูลองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม (ตารางที่ 4.3) เมื่อพิจารณาร่วมกัน จะพบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนบางประการ นั่นคือเชื้อเพลิงผสมที่มีไตรกลีเซอไรด์อยู่มากจะเป็นไขมาก และเชื้อเพลิงผสมที่มีเมทิลเอสเทอร์อยู่มากจะเป็นไขน้อย ข้อค้นพบนี้บ่งชี้ให้ทราบว่า ไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์มีผลส่งเสริมและยับยั้งการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การพิจารณาเบื้องต้นนี้ไม่สามารถ

บอกได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ มีผลอย่างไรต่อการเป็นไขของ เชื้อเพลิงผสม ยิ่งไปกว่านั้น ไม่สามารถระบุได้ว่า องค์ประกอบแต่ละชนิดมีผลส่งเสริมหรือ ยับยั้งการเป็นไข ด้วยสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเท่าไร ดังนั้น การลงเขียนกราฟ ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสม ให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรต่างๆ ของการมีอยู่ขององค์ประกอบ เหล่านี้ในเชื้อเพลิงผสม โดยรวมผลของสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบไว้ในตัวแปร ด้วย อาจพบข้อสรุปที่มีนัยสำคัญของจุดแนวโน้มที่เริ่มเป็นไขร่วมกันของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด



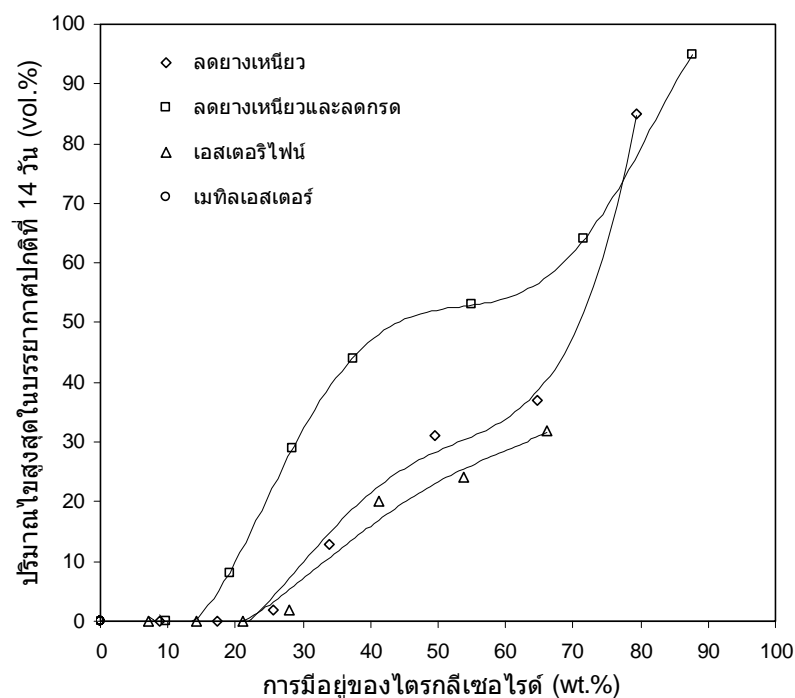
รูปที่ 4.34 ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมในเทอมน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

โดยข้อเท็จจริง ระหว่างเขียนกราฟความสัมพันธ์ เพื่อพิจารณาผลการมีอยู่ขององค์ประกอบ แต่ละชนิดในเชื้อเพลิงผสมต่อการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม ได้ลองเปลี่ยนตัวแปรกลับไปกลับมา หลายๆ ครั้ง ด้วยสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบหลายๆ ค่า อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ง่าย ต่อการเข้าใจ ในที่นี้ขอกล่าวเฉพาะขั้นตอนสรุป และค่าสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ ที่มีนัยสำคัญต่อข้อสรุปที่ค้นพบ

การพิจารณาเริ่มต้นจากการสังเกตผลขององค์ประกอบที่สำคัญและส่งเสริมการเป็นไข นั่นคือ ไตรกลีเซอไรด์ ตามมาด้วยการสังเกตผลขององค์ประกอบที่ยับยั้งการเป็นไข นั่นคือ เมทิล เอสเตอร จากนั้นจึงสังเกตผลของ กรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ และ โมโนกลีเซอไรด์ ตามลำดับ (เรียงตามปริมาณมากไปน้อยขององค์ประกอบที่พบในเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม)

สำหรับสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ ในที่นี้เลือกไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบอ้างอิงและกำหนดตัวคุณหน้าองค์ประกอบเป็น 1.00 สำหรับตัวคุณหน้าองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งบ่งบอกสัดส่วนความสัมพันธ์เทียบกับองค์ประกอบอ้างอิง หลังจากการลองผิดลองถูกหลายครั้ง (trial and error) พบว่า ค่าความละเอียดของช่วงตัวคุณที่ใช้พิจารณาเท่ากับ 0.25 มีนัยสำคัญเพียงพอที่จะให้ข้อสรุปที่มีประโยชน์สำหรับการศึกษานี้

กราฟเฉพาะช่วงสำคัญของการพิจารณาผลการมีอยู่ขององค์ประกอบแต่ละชนิดในเชื้อเพลิงผสมต่อการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมแสดงดังรูปที่ 4.35-4.38 ตามลำดับ รูปที่ 4.35 แสดงปริมาณไขสูงสุดที่เกิดขึ้น เมื่อเขียนในรูปตัวแปรปริมาณไตรกลีเซอไรด์ของเชื้อเพลิงผสม ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดแนวโน้มที่เริ่มเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดยังไม่ทับกัน โดยเชื้อเพลิงผสมที่มีองค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์สูงกว่า มีแนวโน้มปริมาณไขสูงสุดที่เกิดขึ้นมากกว่า เชื้อเพลิงผสมที่มีองค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์ต่ำกว่า สาเหตุหลักน่าจะเป็นเพราะ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไขมันผสมในดีเซลมีเมทิลเอสเทอร์อยู่มากกว่าน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล ขณะที่น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซลมีกรดไขมันอิสระอยู่มากกว่าน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล ซึ่งองค์ประกอบกรดไขมันอิสระนี้น่าจะช่วยยับยั้งการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมเช่นเดียวกับเมทิลเอสเทอร์



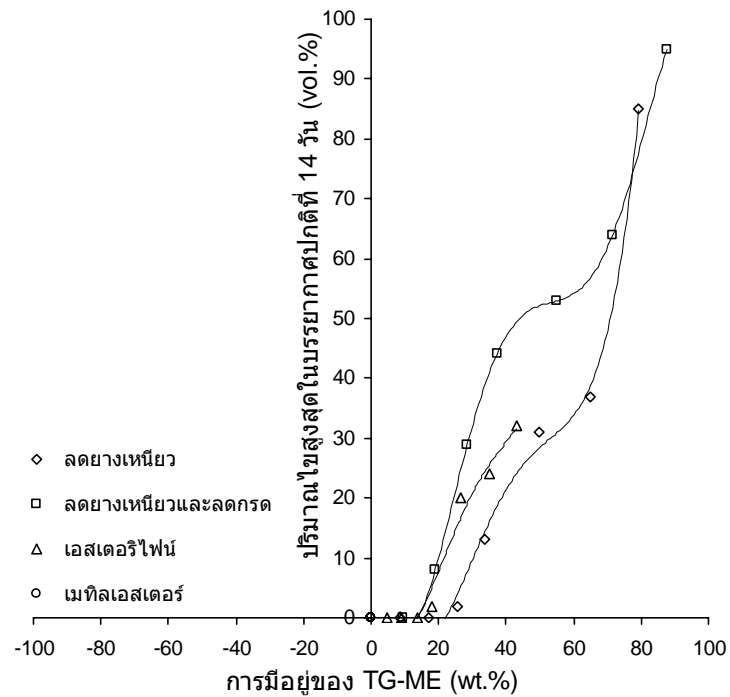
รูปที่ 4.35 ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมในทอมการมีอยู่ของไตรกลีเซอไรด์ (TG)

รูปที่ 4.36 (a-c) แสดงการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมเมื่อนำผลการมีอยู่ของเมทิลเอสเทอร์ในเชื้อเพลิงผสมเข้าเป็นตัวแปรพิจารณาร่วมกับไตรกลีเซอไรด์ จะเห็นได้ว่าตัวแปร TG-ME ซึ่งมีสัดส่วนความสัมพันธ์น้ำหนักประกอบเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ -1.00 เป็นตัวแปรที่ทำให้น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไขมันผสมในดีเซลกับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีจุดแวนโวนัมที่เริ่มเป็นไขทับกันดีที่สุด (เครื่องหมายลบ คือ ผลช่วยยับยั้งการเป็นไข เครื่องหมายบวก คือ ผลช่วยส่งเสริมการเป็นไข) ซึ่งดีกว่าอีก 2 กรณีเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ ค่าใกล้เคียงคือ -0.75 และ -1.25 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด ผสมในดีเซล ไม่มีเมทิลเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการจัดตัวแปรที่รวมผลของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มเติมเพียงชนิดเดียวจึงไม่มีผลทำให้จุดแวนโวนัมเริ่มเป็นไขของเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด จากรูปที่ 4.36 (a) สังเกตได้ว่า ถ้าต้องการให้จุดแวนโวนัมเริ่มเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดทับกันที่จุดเดียว จำเป็นต้องนำผลการมีอยู่ขององค์ประกอบอื่นๆ ในเชื้อเพลิงผสมเข้าเป็นตัวแปรร่วมในการพิจารณาด้วย

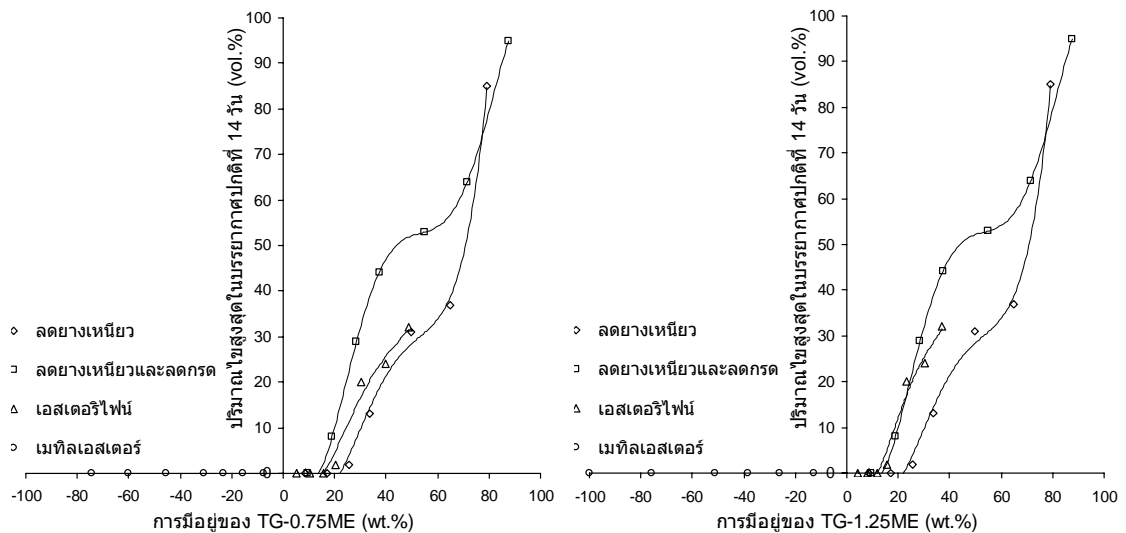
รูปที่ 4.37 (a-c) แสดงการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมเมื่อนำผลการมีอยู่ของกรดไขมันอิสระในเชื้อเพลิงผสมเข้าเป็นตัวแปรพิจารณาร่วมเพิ่มเติม จะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่ทำให้ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไขมันผสมในดีเซล มีจุดแวนโวนัมที่เริ่มเป็นไขทับกันดีที่สุด คือ TG-ME-2.75FFA ข้อค้นพบนี้สามารถสรุปได้ว่า กรดไขมันอิสระมีผลยับยั้งการเป็นไขเช่นเดียวกับเมทิลเอสเทอร์ และยังมีสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในการยับยั้งการเป็นไขสูงกว่าเมทิลเอสเทอร์อีกด้วย

เมื่อนำผลการมีอยู่ของไตรกลีเซอไรด์ในเชื้อเพลิงผสมเข้าเป็นตัวแปรพิจารณาร่วม จะได้กราฟผลการพิจารณาดังรูปที่ 4.38 (a-c) ในทำนองเดียวกัน ตัวแปรที่ให้การทับกันของจุดแวนโวนัมที่เริ่มเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดที่ดีที่สุด คือ TG-ME-2.75FFA-0.5DG จึงสรุปได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์มีผลยับยั้งการเป็นไขเช่นเดียวกับเมทิลเอสเทอร์และกรดไขมันอิสระ แต่มีสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในการยับยั้งการเป็นไขที่น้อยกว่า

นอกจากนี้ เมื่อนำผลการมีอยู่ของโมโนกลีเซอไรด์ในเชื้อเพลิงผสมเข้าเป็นตัวแปรพิจารณาร่วมเพิ่มเติมด้วยนั้น ปรากฏว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญของการทับกันของจุดแวนโวนัมที่เริ่มเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด เนื่องจากเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมมีโมโนกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบอยู่น้อยมากเพียง 0.5-1.2 wt.%

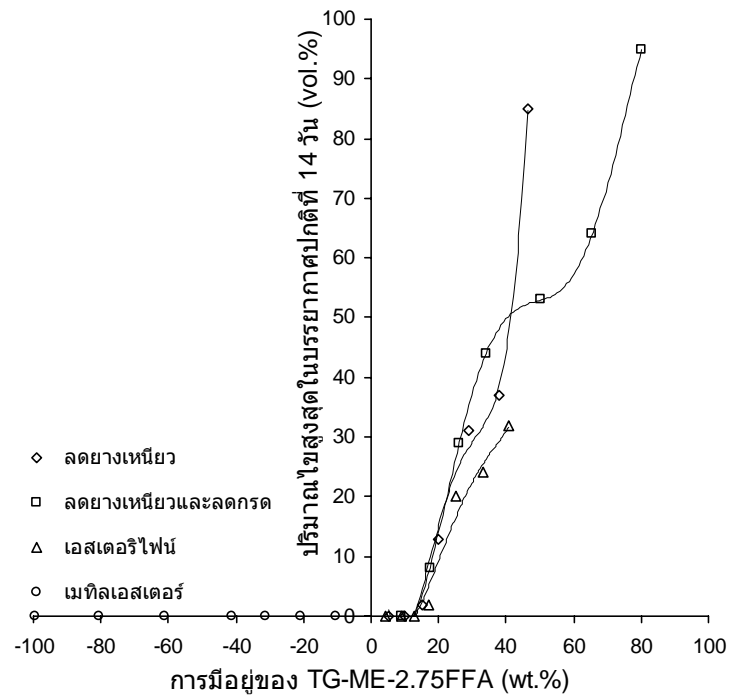


(a) สัดส่วนความสัมพันธั้โมเลกุลของเมทิลเอสเตออร์เท่ากับ -1.00

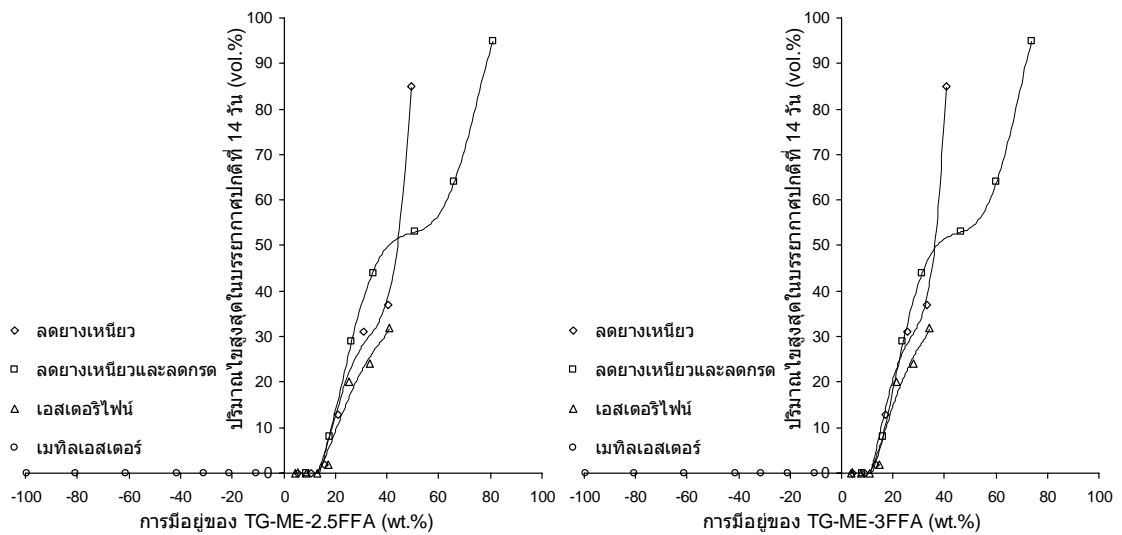


(b) สัดส่วนความสัมพันธั้โมเลกุลของเมทิลเอสเตออร์เท่ากับ -0.75 (c) สัดส่วนความสัมพันธั้โมเลกุลของเมทิลเอสเตออร์เท่ากับ -1.25

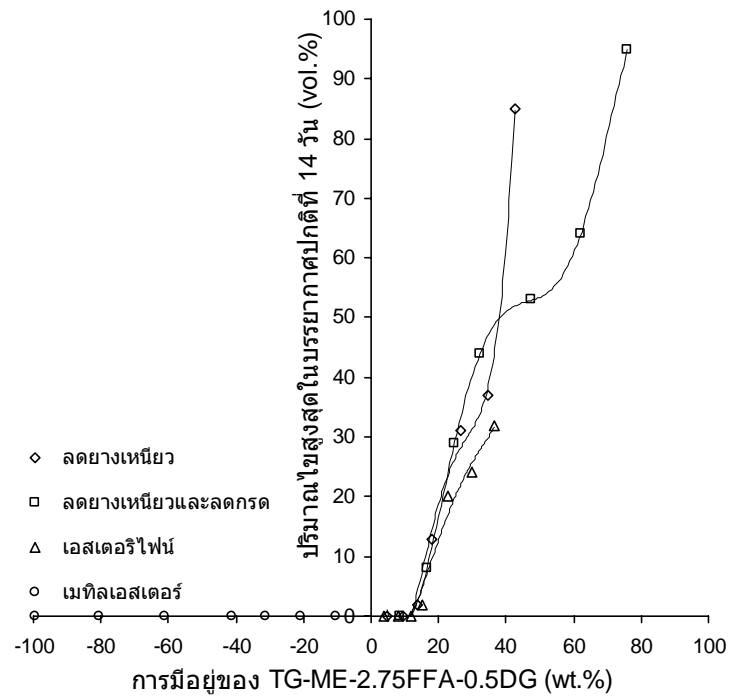
รูปที่ 4.36 ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมในทอมการมีอยู่ของไตรกลีเซอไรด์ (TG) และเมทิลเอสเตออร์ (ME)



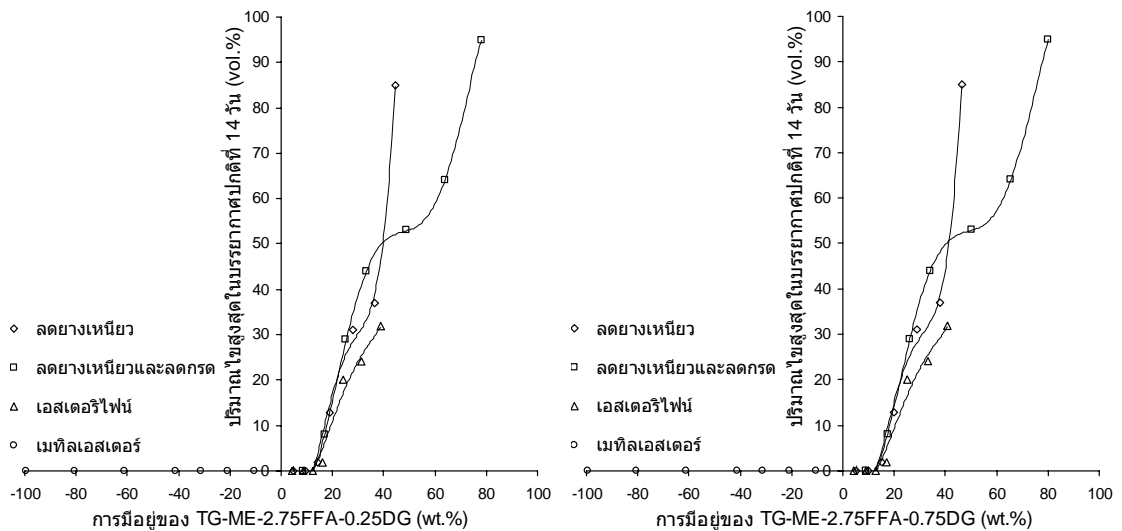
(a) สกัดส่วนความสัมพันธ์โมเลกุลของกรดไขมันอิสระเท่ากับ -2.75

(b) สกัดส่วนความสัมพันธ์โมเลกุล
ของกรดไขมันอิสระเท่ากับ -2.50(c) สกัดส่วนความสัมพันธ์โมเลกุล
ของกรดไขมันอิสระเท่ากับ -3.00

รูปที่ 4.37 ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมในเทอมการมีอยู่ของไตรกลีเซอไรด์ (TG) เมทิลเอสเตอร์ (ME) และกรดไขมันอิสระ (FFA)



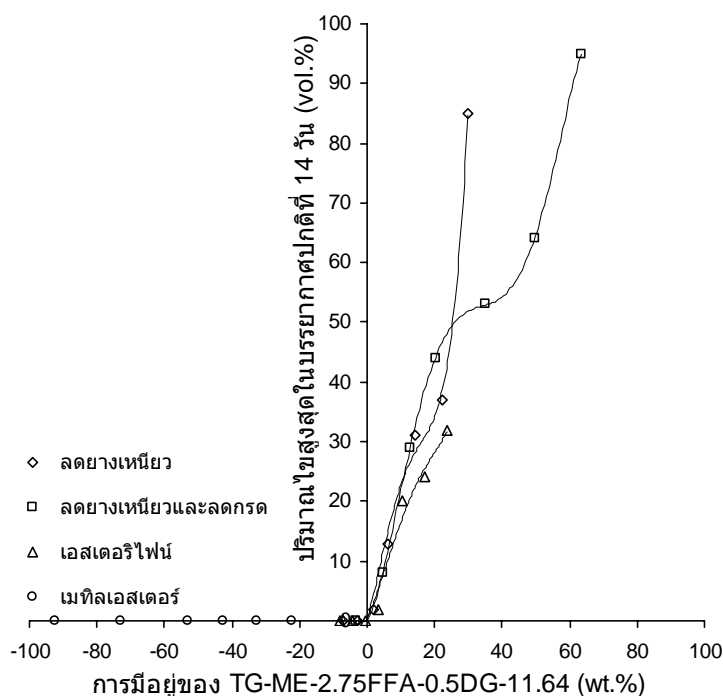
(a) สัดส่วนความสัมพันธไมเคิลของไดกลีเซอไรด์เท่ากับ -0.50



(b) สัดส่วนความสัมพันธไมเคิลของไดกลีเซอไรด์เท่ากับ -0.25 (c) สัดส่วนความสัมพันธไมเคิลของไดกลีเซอไรด์เท่ากับ -0.75

รูปที่ 4.38 ปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมในเทอมการมีอยู่ของไตรกลีเซอไรด์ (TG) เมทิลเอสเตอริ (ME) กรดไขมันอิสระ (FFA) และไดกลีเซอไรด์ (DG)

จากรูปที่ 4.38 (a) ซึ่งเป็นข้อสรุปที่ดีที่สุดจากการพิจารณาผลการมีอยู่ขององค์ประกอบต่างๆ ในเชื้อเพลิงผสมต่อจุดแวนโน้มที่เริ่มเป็นไขร่วมกันของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้กราฟสื่อความหมายชัดเจนมากขึ้น จึงจัดรูปแบบของกราฟให้มีความสัมพันธ์ใหม่ โดยการเลื่อนจุดตัดแกนของตัวแปรการมีอยู่ขององค์ประกอบต่างๆ ด้วยค่าจุดตัดแกนร่วมกันของ แวนโน้มที่เริ่มเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดที่อ่านได้จากรูปที่ 4.38 (a) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.64 ดังนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์สุดท้าย ดังรูปที่ 4.39 ซึ่งในที่นี้ควรหมายเหตุไว้ด้วยว่า ยังมีตัวแปร ที่มีผลต่อการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดอีกหลายปัจจัยที่ยังไม่เข้าใจและยังไม่ได้ศึกษา อย่างละเอียดถี่ถ้วนในงานวิจัยนี้ ดังนั้น ปริมาณไขที่เกิดขึ้นของเชื้อเพลิงผสมจากทุกครั้งของการผลิต (พื้นที่ด้านขวาของกราฟ) ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์เฉพาะสำหรับทำนายได้อย่างแม่นยำ เส้นกราฟในรูปนี้จึงเป็นเพียงแนวโน้มปริมาณไขสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.39 เส้นไขการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมในดีเซลใน เทอมการมีอยู่ของไตรกลีเซอไรด์ (TG) เมทิลเอสเตอร์ (ME) กรดไขมันอิสระ (FFA) และไดกลีเซอไรด์ (DG)

อย่างไรก็ตาม ประโยชน์สำคัญที่สุดของกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.39 คือ สามารถบ่งบอก เส้นไขการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมในดีเซล ดังสมการที่ 4.64 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่สามารถวัดได้แม่นยำในทุกกรณี (หมายถึง การไม่เป็นไข

ของเชื้อเพลิงผสมที่ศึกษา เป็นผลการทดลองที่วัดได้อย่างแม่นยำ และในทุกกรณีของผลการทดลองที่เชื้อเพลิงผสมไม่เป็นไขก็สอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ 4.64)

เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมในดีเซล ไม่เป็นไข

$$TG - ME - 2.75FFA - 0.5DG - 11.64 \leq 0 \quad (4.64)$$

กำหนดให้

TG คือ สัดส่วนของไตรกลีเซอไรด์ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)

ME คือ สัดส่วนของเมทิลเอสเทอร์ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)

FFA คือ สัดส่วนของกรดไขมันอิสระในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)

DG คือ สัดส่วนของไดกลีเซอไรด์ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%)

จากข้อสรุปที่ค้นพบในสมการที่ 4.64 จะเห็นได้ว่า การไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมผสมในดีเซล มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับความยาวโมเลกุลขององค์ประกอบในเชื้อเพลิงผสม ซึ่งองค์ประกอบห่วงโซ่ยาวเฉพาะไตรกลีเซอไรด์เท่านั้นที่ส่งเสริมการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม และองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีห่วงโซ่สั้นลงมีผลยับยั้งการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม โดยสัดส่วนความสามารถในการยับยั้งการเป็นไขมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับองค์ประกอบที่มีห่วงโซ่สั้นลง

นอกจากนี้ เมื่อนำสมการที่ 4.64 ข้อมูลการวัดองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมในตารางที่ 4.6 และสมการคำนวณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมกับดีเซลที่สัดส่วนการผสมต่างๆ (สมการที่ 4.2) มาคำนวณร่วมกัน พบว่า น้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบที่บรวหมลดยางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลสูงสุด 30 25 และ 14 vol.% ตามลำดับ โดยที่เชื้อเพลิงผสมไม่เป็นไข

4.6 การเลือกเชื้อเพลิงผสม

จากการศึกษาคุณลักษณะการเป็นของเหลวที่สำคัญ 3 ประเภท ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ของเชื้อเพลิงผสม ได้ผลสรุปสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยที่เชื้อเพลิงผสมมีความหนืด และความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย และไม่เป็นไขเมื่อวางในสภาพแวดล้อมปกติเป็นเวลา 14 วัน ดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 สำหรับตารางที่ 4.12 สรุปผลด้วยข้อมูลการทดลองที่เห็นประจักษ์ ส่วนตารางที่ 4.13 สรุปผลด้วยสมการทำนาย

ตารางที่ 4.12 ทัศนคติต่อการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่รวบรวม โดยที่เชื้อเพลิงผสมมีความหนืด และความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของไทย และไม่เป็นที่พอใจ 14 วัน ข้อมูลได้จากผลการทดลอง (vol.%)

ชนิดเชื้อเพลิง	ทัศนคติต่อการผสมเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลในดีเซลสูงสุด (vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานประเภทต่างๆ											
	ดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร				ดีเซลหมุนช้า				ดีเซลหมุนเร็ว			
	ความหนืด	ความหนาแน่น	ไม่เป็นที่พอใจ	ผ่านเงื่อนไขทั้งหมด	ความหนืด	ความหนาแน่น	ไม่เป็นที่พอใจ	ผ่านเงื่อนไขทั้งหมด	ความหนืด	ความหนาแน่น	ไม่เป็นที่พอใจ	ผ่านเงื่อนไขทั้งหมด
1) ปาล์มดิบที่รวมลดของเหนียวผสมในดีเซล	20	60	20	20	20	80	20	20	0	20	20	0
2) ปาล์มดิบที่รวมลดของเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล	20	60	10	10	20	80	10	10	0	20	10	0
3) ปาล์มดิบที่รวมเอสเทอร์ไฟน์ผสมในดีเซล	40	60	30	30	40	100	30	30	0	40	30	0
4) เมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล	100	100	100	100	100	100	100	100	40	60	100	40

ตารางที่ 4.13 ทัศนคติต่อการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิง 4 ชนิด ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบที่รวบรวม โดยที่เชื้อเพลิงผสมมีความหนืด และความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของไทย และไม่เป็นที่พอใจไว้ 14 วัน ข้อมูลได้จากผลการทำนาย (vol.%)

ชนิดเชื้อเพลิง	ทัศนคติต่อการผสมเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลในดีเซลสูงสุด (vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานประเภทต่างๆ											
	ดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร				ดีเซลหมุนช้า				ดีเซลหมุนเร็ว			
	ความหนืด	ความหนาแน่น	ไม่เป็นที่พอใจ	ผ่านเงื่อนไขทั้งหมด	ความหนืด	ความหนาแน่น	ไม่เป็นที่พอใจ	ผ่านเงื่อนไขทั้งหมด	ความหนืด	ความหนาแน่น	ไม่เป็นที่พอใจ	ผ่านเงื่อนไขทั้งหมด
1) ปาล์มดิบที่รวมลดของเหนียวผสมในดีเซล	38	67	25	25	38	89	25	25	10	36	25	10
2) ปาล์มดิบที่รวมลดของเหนียวและลดกรดผสมในดีเซล	36	67	14	14	36	89	14	14	10	36	14	10
3) ปาล์มดิบที่รวมเอสเทอร์ไฟน์ผสมในดีเซล	46	78	30	30	46	100	30	30	13	42	30	13
4) เมทิลเอสเทอร์ผสมในดีเซล	100	100	100	100	100	100	100	100	57	71	100	57

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เลือกสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม ในตารางที่ 4.12 เป็นหลัก เนื่องจากผลการทดลองปรากฏเด่นชัด และผ่านการสังเกตขณะทดลอง ส่วนตารางที่ 4.13 เป็นการทำนายแนวโน้มจุดสูงสุดที่สภาวะเหมาะสม (optimization) แต่ผลการทำนายยังไม่ได้ตรวจสอบ หรือพิสูจน์จริง

จากตารางที่ 4.12 การเลือกเชื้อเพลิงผสมสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรและเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ (มาตรฐานดีเซลหมุนช้า) เมื่อพิจารณา 3 เงื่อนไขข้างต้น พบว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด 30 20 และ 10 vol.% เรียงจากมากไปน้อย ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนการผสมดังกล่าวถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขการเป็นไขเป็นหลัก ขณะที่เงื่อนไขความหนืดและความหนาแน่น ของสัดส่วนการผสมมีผลต่อการพิจารณา น้อยมาก สำหรับเมทิลเอสเทอร์มีคุณสมบัติผ่าน 3 เงื่อนไขทั้งหมด สามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรและเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำโดยตรง นอกจากนี้ ในตารางที่ 4.12 ยังพบข้อสรุปการเลือกเชื้อเพลิงผสมสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูง (มาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว) ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงทั้งหมดถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขความหนืด เมื่อพิจารณา มาตรฐานดีเซลทุกประเภท พบว่า คุณสมบัติความหนาแน่นมีผลต่อการพิจารณาสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงน้อยที่สุด

นอกจากการพิจารณาเงื่อนไขคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม เพื่อต้องการเชื้อเพลิงที่ผลิตง่าย มีราคาแข่งขันกับดีเซลได้ จึงนำผลการศึกษาการผลิต และต้นทุน (หัวข้อ 4.1) เป็นเงื่อนไขพิจารณาเพิ่มเติม พบว่า การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ มีขั้นตอนการผลิตน้อยกว่าน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด และเมทิลเอสเทอร์ และใช้เวลาในการผลิตน้อยกว่า 3.5 ชม.

สำหรับมุมมองการพึ่งพาสารเคมีภายนอกชุมชน พบว่า การผลิตเมทิลเอสเทอร์จำเป็นต้องพึ่งพาสารเคมีจากแหล่งภายนอก (โดยเฉพาะเมทานอล) สูงสุด รองลงมาคือน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ ส่วนเชื้อเพลิงอีก 2 ชนิดที่เหลือพึ่งพาสารเคมีจากแหล่งภายนอกน้อยมาก โดยเฉพาะการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว ใช้กรดฟอสฟอริกเพียง 0.25 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเท่านั้น

เมื่อพิจารณาปริมาณการได้คืนสำหรับการผลิตเชื้อเพลิง 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม พบว่า การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ มีปริมาณการได้คืนสูงสุด 98 และ 96 vol.% สำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์ มีปริมาณการได้คืน

ต่ำกว่าเล็กน้อยอยู่ที่ 93.12 vol.% ส่วนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่บวมลดยางเหนียวและลดกรด มีปริมาณการได้คืนต่ำสุดที่ 53.90 vol.%

อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณต้นทุนการผลิต (เฉพาะวัตถุดิบ สารเคมี น้ำ และพลังงาน) พบว่า น้ำมันปาล์มดิบที่บวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบที่บวมเอสเตอร์ไฟน์ เมทิลเอสเตอร์ และ น้ำมันปาล์มดิบที่บวมลดยางเหนียวและลดกรด มีต้นทุนสูงขึ้นตามลำดับดังนี้ 22.77 28.55 35.69 และ 43.01 บาท/ลิตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับราคาดีเซลขายปลีกหน้าปั๊มเฉลี่ย (ทั่วประเทศและภาคใต้) 28.18-28.21 บาท/ลิตร พบว่า น้ำมันปาล์มดิบที่บวมลดยางเหนียว เป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจมากที่สุด มีต้นทุนเพิ่มขึ้นจากน้ำมันปาล์มดิบที่บวมเพียง 0.91 บาท/ลิตร (4.18 % ของราคาน้ำมันปาล์มดิบที่บวม) และมีราคาต่ำกว่าดีเซลขายปลีกหน้าปั๊ม 5.41-5.44 บาท/ลิตร ส่วนน้ำมันปาล์มดิบที่บวมเอสเตอร์ไฟน์มีความน่าสนใจเช่นเดียวกัน มีราคาสูงกว่าดีเซลขายปลีกหน้าปั๊มเพียง 0.34-0.37 บาท/ลิตร และมีต้นทุนเพิ่มขึ้นจากน้ำมันปาล์มดิบที่บวม 6.69 บาท/ลิตร (30.62 % ของราคาน้ำมันปาล์มดิบที่บวม) อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ที่สามารถลดต้นทุนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่บวมเอสเตอร์ไฟน์ให้ต่ำลง (หัวข้อ 5.2 ข้อเสนอแนะ)

ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่กล่าวมา โดยสรุป งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ น้ำมันปาล์มดิบที่บวมลดยางเหนียวผสมในดีเซล 20 vol.% (ลดยางเหนียว 20) และน้ำมันปาล์มดิบที่บวมเอสเตอร์ไฟน์ผสมในดีเซล 30 vol.% (เอสเตอร์ไฟน์ 30) เนื่องจากเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 ชนิด มีความน่าสนใจ ในด้านการผลิต ราคา และคุณสมบัติการเป็นของเหลว ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำเชื้อเพลิง 2 ชนิด ดังกล่าว ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรเปรียบเทียบการดีเซล

4.6.1 การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง

สำหรับเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ ลดยางเหนียว 20 เอสเตอร์ไฟน์ 30 และดีเซล ควรทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานให้ครอบคลุมมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ด้วยเงื่อนไขจำกัดของเงินทุนวิจัยที่มี งานวิจัยนี้จึงพยายามทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 ให้ครอบคลุมคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ สำหรับดีเซล ได้ทดสอบคุณสมบัติเฉพาะที่ใช้คำนวณตัวแปรสมรรถนะเครื่องยนต์ แต่คุณสมบัติอื่นๆ ของดีเซล ที่ใช้อ้างอิงประกอบการวิจารณ์ผล ได้จากการทบทวนเอกสารและการประมาณเทียบจากมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งรายละเอียดคุณสมบัติเชื้อเพลิง และห้องปฏิบัติการทดสอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 รายการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดและห้องปฏิบัติการที่ทดสอบ

ชนิดคุณสมบัติ	ห้องปฏิบัติการ	เชื้อเพลิงทดสอบ		
		ลดยางเหนียว	เอสเตอรีไฟน์	ดีเซล
		20	30	
ค่าซีเทน	การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย	ทดสอบ	-	-
ความหนืด	วิศวกรรมเคมี	ทดสอบ	ทดสอบ	ทดสอบ
ความหนาแน่น	วิศวกรรมเครื่องกล	ทดสอบ	ทดสอบ	ทดสอบ
ความร้อนต่ำ	อุตสาหกรรมการเกษตร	ทดสอบ	ทดสอบ	ทดสอบ
จุดวาบไฟ	วิศวกรรมเคมี	ทดสอบ	ทดสอบ	-
จุดขุ่น	วิศวกรรมเคมี	ทดสอบ	ทดสอบ	-
จุดไหลเท	วิศวกรรมเคมี	ทดสอบ	ทดสอบ	-
กากถ่าน	ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์	ทดสอบ	ทดสอบ	-
เถ้าซิลิเฟด	ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์	ทดสอบ	ทดสอบ	-
ค่ากรด	วิศวกรรมเครื่องกล (คำนวณค่าจากการไตเตรท)	ทดสอบ	ทดสอบ	-
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	วิศวกรรมเคมี	ทดสอบ	ทดสอบ	ทดสอบ

หมายเหตุ: คุณสมบัติในตารางที่ 7.3 ยกเว้นค่าซีเทน ทดสอบ ณ หน่วยงานในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

4.6.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ

คุณสมบัติเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ของ ลดยางเหนียว 20 เอสเตอรีไฟน์ 30 และดีเซล ที่ได้จากการทดสอบ การทบทวนเอกสาร และการประมาณจากมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วของกรมธุรกิจพลังงาน แสดงดังตารางที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ของ ลดยางเหนียว 20 และเอสเตอรีไฟน์ 30 กับดีเซล สามารถจำแนกผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิง และรายละเอียดคุณสมบัติเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ดังนี้

ค่าซีเทน เป็นคุณสมบัติการเผาไหม้ที่สำคัญที่สุดสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อ 2.4 ก่อนหน้านี้ โดยลดยางเหนียว 20 และเอสเตอรีไฟน์ 30 มีค่าซีเทนสูงกว่าดีเซลอย่างชัดเจนประมาณ 4.8-9.8

ความหนืดจลศาสตร์ และความหนาแน่น เป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งได้กล่าวในบทที่ 4 และ 5 ก่อนหน้านี้ โดย ลดยางเหนียว 20 และเอสเตอรีไฟน์ 30 มีความหนืดจลศาสตร์สูงกว่าดีเซล 2.01 และ 2.61 cSt ตามลำดับ และมีความหนาแน่น สูงกว่าดีเซล 20 และ 23 kg/m³ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาน้ำหนักโมเลกุล (ตารางที่ 4.6) เพิ่มเติม จะเห็นได้ว่า เอสเตอรีไฟน์ 30 ลดยางเหนียว 20 และดีเซล มีความหนืดจลศาสตร์ และความหนาแน่น เรียงจากมากไปน้อยตามน้ำหนักโมเลกุล

ตารางที่ 4.15 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ของประเทศไทย

ชนิดคุณสมบัติ	วิธีทดสอบ	มาตรฐานประเทศไทย			เชื้อเพลิงทดสอบ		
		ดีเซล		ดีเซล เครื่องยนต์ การเกษตร	ลดยาง เหนียว 20	เอสเตอ รีไฟน์ 30	ดีเซล
		หมุนเร็ว	หมุนช้า				
ค่าซีเทน	ASTM D613	≥47	≥45	≥47	56.8	≥56.8 ^B	47-52 ^A
ความหนืดจลศาสตร์ที่ 40 °C (cSt)	ASTM D445	1.8-4.1	≤8.0	1.9-8.0	5.25	5.85	3.24
ความหนาแน่นที่ 15.6 °C (kg/□)	ASTM D1298	810-870	≤920	860-900	855	858	835
ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)	ASTM D240	n.a.	n.a.	n.a.	41,447	41,381	42,947
จุดวาบไฟ (°C)	ASTM D93	≥52	≥52	≥120	77	78	69 ^A
จุดขุ่น (°C)	ASTM D2500	n.a.	n.a.	n.a.	12	10	-
จุดไหลเท (°C)	ASTM D97	≤10	≤16	n.a.	1	1	≤1 ^B
กากถ่าน (wt.%)	ASTM D482	≤0.05	n.a.	n.a.	0.20	0.14	≤0.05 ^B
เถ้าซิลิเกต (wt.%)	ASTM D189	≤0.01	≤0.02	≤0.02	0.0074	0.0056	≤0.01 ^B
ค่ากรด (□gKOH/g)	ASTM D654	n.a.	n.a.	≤0.80	≈4.97	≈0.08	-
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (หมายเลข)	ASTM D130	≤1	n.a.	≤3	1a	1a	1a

n.a. = ไม่กำหนด; ^Aอ้างอิง Leevijit and Prateepchaikul, 2011; ^Bค่าประมาณ

หมายเหตุ: กำหนดค่าซีเทนของดีเซลหมุนเร็ว ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป ≥50

ค่าความร้อนต่ำ เป็นคุณสมบัติการเผาไหม้หนึ่งสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดย ลดยางเหนียว 20 และเอสเตอรีไฟน์ 30 มีค่าความร้อนต่ำต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อยประมาณ 1,500 และ 1,566 kJ/kg ตามลำดับ (3.49 และ 3.65 %) สาเหตุเกิดจากสัดส่วนโดยมวลของดีเซล ลดยางเหนียว 20 และเอสเตอรีไฟน์ 30 มีอะตอมคาร์บอน 86.88 81.15 และ 79.69 wt.% ไฮโดรเจน 13.12 12.48 และ 12.31 wt.% และออกซิเจน 0.00 6.38 และ 8.01 wt.% ตามลำดับ ซึ่งลักษณะทั่วไปของอะตอมคาร์บอน และไฮโดรเจนจะให้ค่าความร้อนสูงมาก ส่วนอะตอมออกซิเจนจะไม่ให้ความร้อน แต่จะช่วยในการสันดาปเชื้อเพลิง

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิต่ำสุดของเชื้อเพลิงเหลวที่เชื้อเพลิงเหลวสามารถระเหยเป็นไอและมีปริมาณมากพอที่จะสัมผัสเปลวไฟก็จะลุกไหม้ทันที โดยทั่วไปจุดวาบไฟจะไม่มีผลต่อคุณภาพหรือการใช้งานโดยตรง แต่เป็นข้อกำหนดทางกฎหมายเพื่อความปลอดภัยจากการเกิดอัคคีภัยในการเก็บรักษาและการขนถ่าย โดยปกติจุดวาบไฟ ไม่ควรเกิน 130°C ถ้าสูงกว่านี้จะทำให้รถสตาร์ทติดยาก สำหรับ ลดยางเหนียว 20 และเอสเตอรีไฟน์ 30 มีจุดวาบไฟใกล้เคียงกันมากกว่าดีเซลเล็กน้อยประมาณ 8-9°C และยังผ่านมาตรฐานดีเซลทุกประเภท เมื่อพิจารณาน้ำหนัก

โมเลกุล (ตารางที่ 4.6) เพิ่มเติม พบว่า เอสเตอร์ไฟน์ 30 ลดยางเหนียว 20 และดีเซล มีความไว
เรียงจากสูงไปต่ำตามน้ำหนักโมเลกุล

จุดขุ่น คือ อุณหภูมิค่าที่ต่ำสุดที่ไขเชื้อเพลิงเหลว เริ่มตกผลึกเป็นฝ้า จุดนี้มีความสำคัญเป็น
พิเศษสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล เพราะการที่ไขเริ่มตกผลึก สามารถทำให้ไส้กรอง
อุดตันได้อย่างรวดเร็ว จุดขุ่นของลดยางเหนียว 20 และเอสเตอร์ไฟน์ 30 อยู่ที่อุณหภูมิ 12 และ 10°C
สำหรับประเทศไทย ศูนย์เตือนภัยพิบัติแห่งชาติ กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
ได้กำหนดพื้นที่ภัยพิบัติภัยหนาวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 16°C เพราะฉะนั้น ลดยางเหนียว 20 และเอสเต
อร์ไฟน์ 30 เป็นเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสมเหมาะสมสำหรับใช้งานในสภาพแวดล้อมปกติทั่วไป

จุดไหลเท คือ อุณหภูมิค่าที่ต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเหลวสามารถไหลได้ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าจุดนี้
เชื้อเพลิงเหลวจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งทั้งหมด การใช้เชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์ที่มี
อุณหภูมิต่ำกว่าจุดไหลเท เชื้อเพลิงเหลวจะเปลี่ยนเป็นของแข็งอุดตันบริเวณหัวฉีด ท่อ ไส้กรอง
และทางเดินน้ำมัน ทำให้เครื่องยนต์ไม่สามารถใช้งานได้ สำหรับจุดไหลเทของ ลดยางเหนียว 20
และเอสเตอร์ไฟน์ 30 อยู่ที่อุณหภูมิ 1°C ซึ่งผ่านมาตรฐานดีเซลทุกประเภท

กากถ่าน คือ สารประกอบคาร์บอนที่เหลือจากการระเหย เป็นคุณสมบัติความสะอาดของ
เชื้อเพลิง ที่ขึ้นกับความสะอาดในกระบวนการผลิต ถ้าเชื้อเพลิงมีปริมาณกากถ่านหรือกาก
คาร์บอนสูง จะมีผลต่อการเกิดคราบเขม่าเกาะสะสมตามบริเวณห้องเผาไหม้ ร่องแหวน ลูกสูบ
และหัวฉีด เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิง 3 ชนิด ลดยางเหนียว 20 และเอสเตอร์ไฟน์ 30 มีกากถ่าน
สูงกว่าดีเซลเล็กน้อยประมาณ 0.15 และ 0.09 wt.% เมื่อพิจารณามาตรฐานดีเซลของกรมธุรกิจ
พลังงาน จะเห็นได้ว่า กรมธุรกิจพลังงาน ไม่ได้กำหนดคุณสมบัติกากถ่านสำหรับมาตรฐานดีเซล
หมุนช้า และดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร แต่กำหนดเฉพาะมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว ซึ่ง ลดยางเหนียว
20 และเอสเตอร์ไฟน์ 30 ไม่ผ่านมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว

เถ้าซัลเฟต เป็นการหาปริมาณสารอัลคาไลน์อนุภาคของแข็งในเชื้อเพลิง และเป็น
คุณสมบัติความสะอาดของเชื้อเพลิง ที่ขึ้นกับความสะอาดในการผลิต สำหรับ ลดยางเหนียว 20
และเอสเตอร์ไฟน์ 30 มีเถ้าซัลเฟตใกล้เคียงดีเซลมาก และผ่านมาตรฐานดีเซลทุกประเภท

ค่ากรด เป็นคุณสมบัติเชื้อเพลิง ที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ของเครื่องยนต์ สำหรับเอสเตอร์ไฟน์
30 แทบจะไม่มีความเป็นกรด ส่วน ลดยางเหนียว 20 มีค่าความเป็นกรดที่ 4.97 gKOH/g

การกัดกร่อนแผ่นทองแดง คือ การทดสอบพฤติกรรมกัดกร่อนของเชื้อเพลิงด้วยแผ่น
ทองแดง ทดสอบเพื่อควบคุมและป้องกันความเสียหายจากการกัดกร่อนของเชื้อเพลิงในถังเก็บ
ท่อ ทางเดินน้ำมัน และห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ ผลการทดสอบ พบว่า ลดยางเหนียว 20 และ

เอสเตอรีฟีน 30 มีการกักกรองบนแผ่นทองแดงผ่านมาตรฐานดีเซลทุกประเภท และอยู่ในเกณฑ์เดียวกับ ดีเซล

4.7 การทดสอบสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์การเกษตร

4.7.1 การเดินเครื่องยนต์ทั่วไป

การสตาร์ทเครื่องยนต์ และเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 3 ชนิด ที่ช่วงความเร็วรอบกลางๆ ประมาณ 1,600-2,400 rpm โดยไม่เพิ่มภาระโหลด เครื่องยนต์สามารถสตาร์ทติดง่าย เดินเรียบ และไม่มีการน็อกเกิดขึ้น

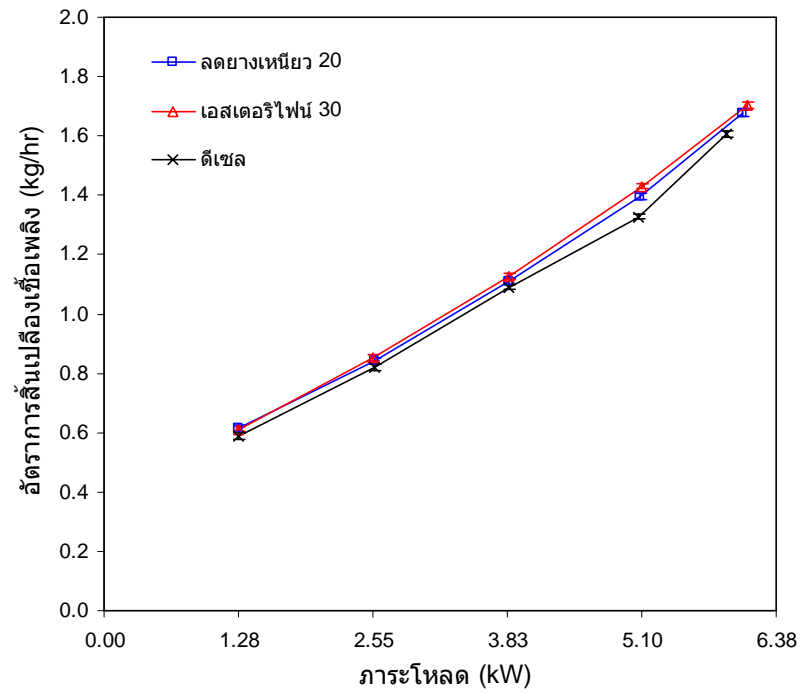
4.7.2 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

สำหรับการเดินเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm แสดงอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 4.40-4.41 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามภาระโหลดและความเร็วรอบ ลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะทั่วไปของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm พบว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอรีฟีน 30 มีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 5.74 และ 7.31% ตามลำดับ

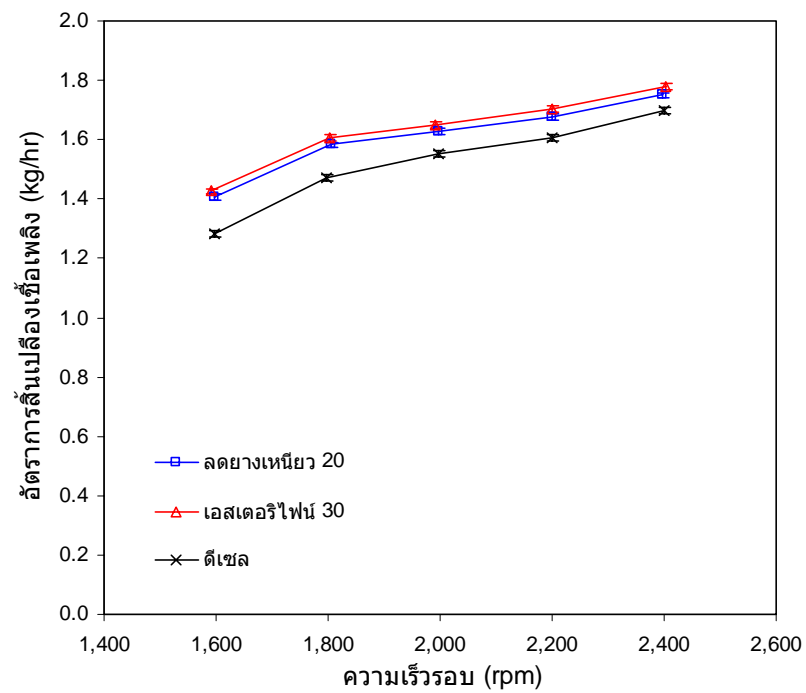
4.7.3 สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย

โดยทั่วไป เป็นที่ทราบกันว่า เครื่องยนต์ดีเซล สามารถเพิ่มปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ตามภาระโหลดและความเร็วรอบที่สูงขึ้น แต่ไม่สามารถเพิ่มปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงได้ถูกต้องตามสัดส่วนการเผาไหม้ทางทฤษฎี ซึ่งการวิเคราะห์สัดส่วนก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในไอเสีย สามารถใช้เป็นข้อมูลบ่งบอกลักษณะสัดส่วนการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงในการสันดาป

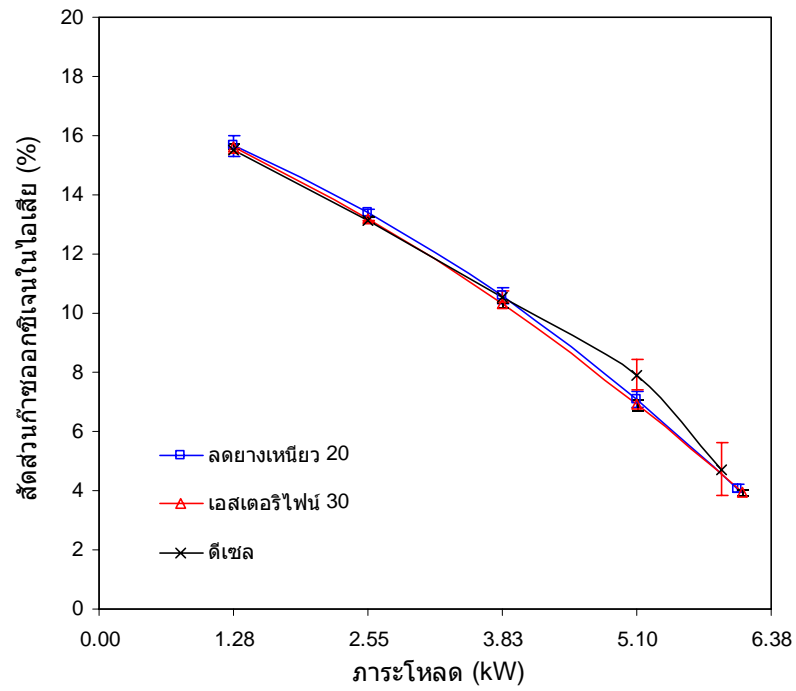
สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย หรือ สัดส่วนก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการสันดาป เป็นตัวบ่งบอกความสามารถนำออกซิเจนในไอเสียไปใช้ในการสันดาป สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียเมื่อเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm แสดงดังรูปที่ 4.42-4.43 ตามลำดับ



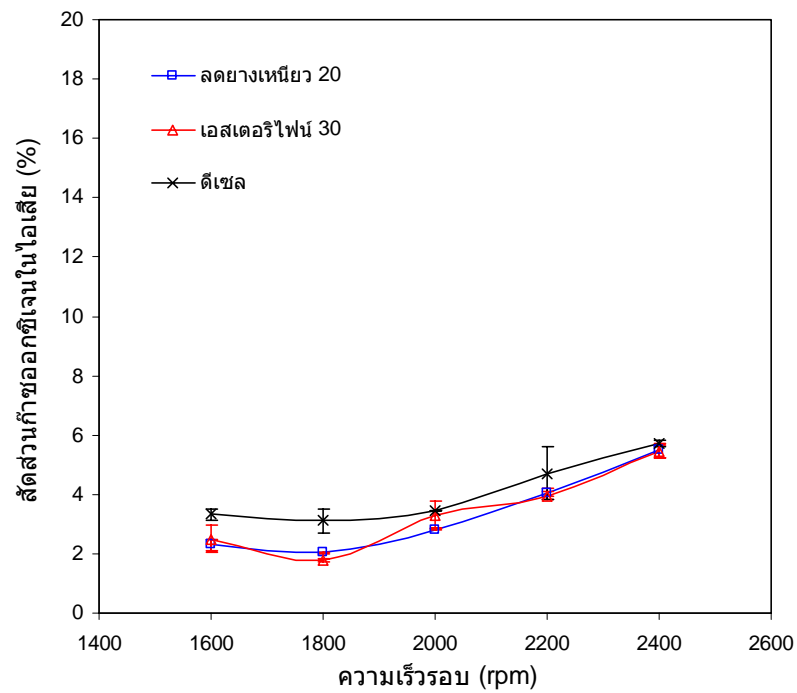
รูปที่ 4.40 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.41 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)



รูปที่ 4.42 สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.43 สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (เดินเครื่องเต็มกำลัง)

สำหรับการเดินเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm เมื่อพิจารณาสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสีย รูปที่ 4.42 พบว่า ที่ภาระโหลดต่ำสุด 1.28 kW สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียมีค่าสูงมาก 15.5-15.7% เมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียเริ่มมีค่าลดลง สาเหตุจากเครื่องยนต์ต้องการพลังงานจากเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.40) จึงต้องใช้ก๊าซออกซิเจนในไอดีปริมาณสูงสำหรับการสันดาป ซึ่งที่ภาระโหลดเต็มที่ (2,200 rpm) สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียมีค่า 4.0-4.7%

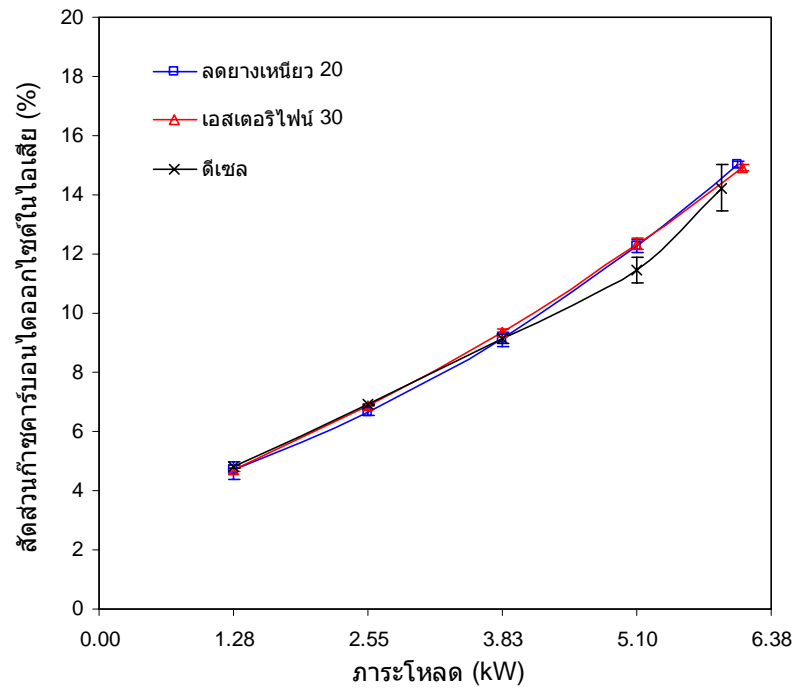
ส่วนการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm รูปที่ 4.43 สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด พบว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 มีสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเจเลีย 17.68 และ 16.38% ตามลำดับ

4.7.4 สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย

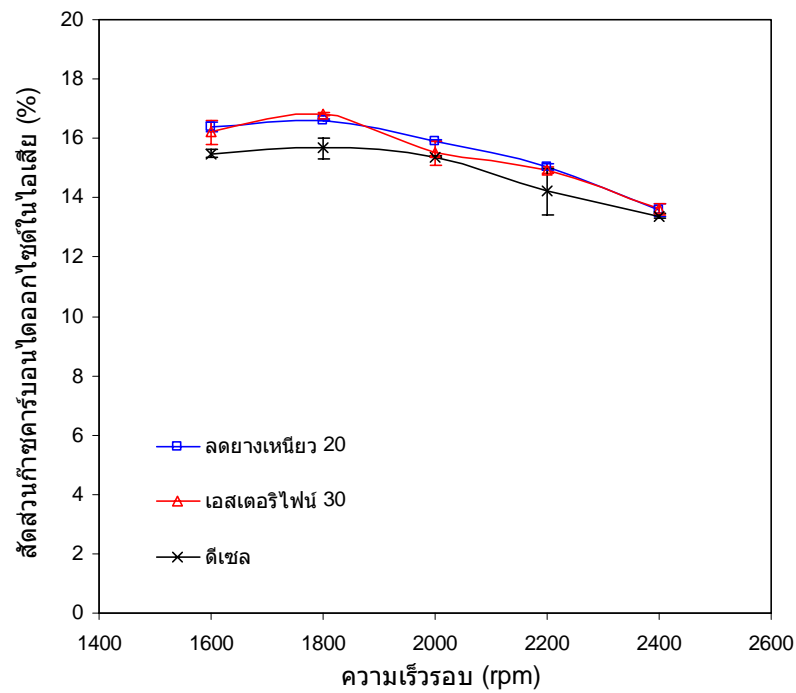
สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย เป็นตัวบ่งบอกการเผาไหม้สมบูรณ์ ถ้าสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียสูง การเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจะใกล้เคียง การเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ถ้าสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียต่ำ หรือมีสัดส่วนก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียสูง การเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง จะทำได้ไม่สมบูรณ์

สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียเมื่อเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm แสดงดังรูปที่ 4.44-4.45 ตามลำดับ

สำหรับการเดินเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm เมื่อพิจารณาสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย รูปที่ 4.44 พร้อมทั้งสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียในไอเสีย รูปที่ 4.42 พบว่า ที่ภาระโหลดต่ำสุด 1.28 kW สัดส่วนการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบบาง เนื่องจากสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียมีค่าสูงมาก ขณะที่ สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำมากเช่นเดียวกัน อยู่ที่ 4.7-4.8% เมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น สัดส่วนการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงเริ่มหนาขึ้นเล็กน้อย สังเกตได้จากสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียเริ่มมีค่าลดลง ขณะที่สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ภาระโหลดเต็มที่ (2,200 rpm) สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียมีค่า 14.2-15.0%



รูปที่ 4.44 สัคส่วนกำชคาร์บอณไดออกไซค์ในไอเสีในไอเสี (ควมเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.45 สัคส่วนกำชคาร์บอณไดออกไซค์ในไอเสีในไอเสี (ค่นเครื่องเต็มกำถ้ง)

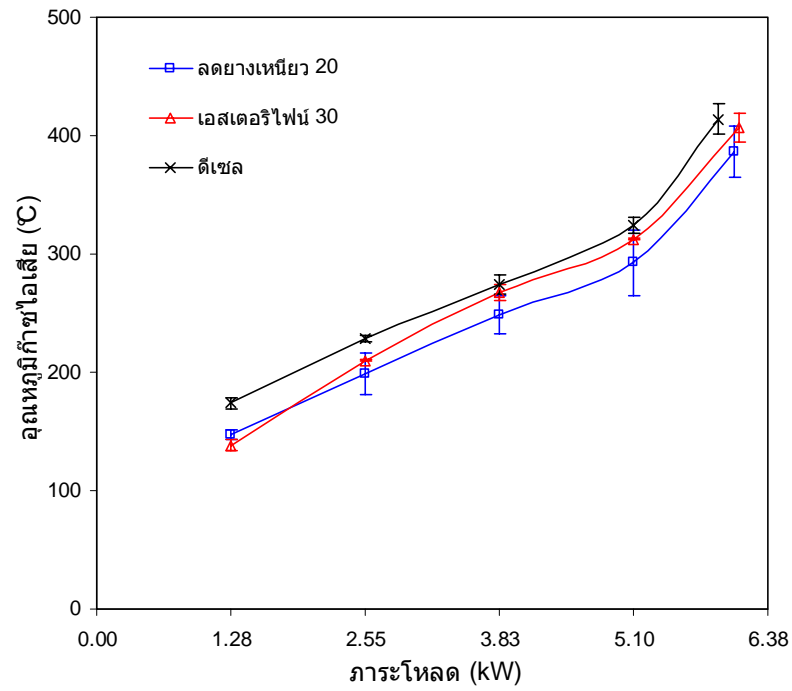
ส่วนการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm เมื่อพิจารณา สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย รูปที่ 4.45 พร้อมทั้งสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียใน ไอเสีย รูปที่ 4.43 ที่ช่วงความเร็วรอบ 2,000 ถึง 2,200 rpm สัดส่วนก๊าซออกซิเจน และสัดส่วน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียมีค่า 2.8-4.7 และ 14.2-15.9% ตามลำดับ สำหรับที่ช่วง ความเร็วรอบต่ำกว่า 2,000 rpm สัดส่วนการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงเริ่มหนาขึ้น เนื่องจากสัดส่วน ก๊าซออกซิเจนในไอเสียมีค่าน้อยมาก (1.8-3.3%) ขณะที่สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า สูงมากเช่นเดียวกัน (15.5-16.8%) ส่วนที่ช่วงความเร็วรอบสูงกว่า 2,200 rpm สัดส่วนการผสม อากาศกับเชื้อเพลิงเริ่มบางขึ้น เนื่องจากสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย (5.4- 5.7%) ขณะที่สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน (13.4-13.6%) เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด พบว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอ ริไฟน์ 30 มีสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 4.56 และ 4.00% ตามลำดับ

4.7.5 อุณหภูมิก๊าซไอเสีย

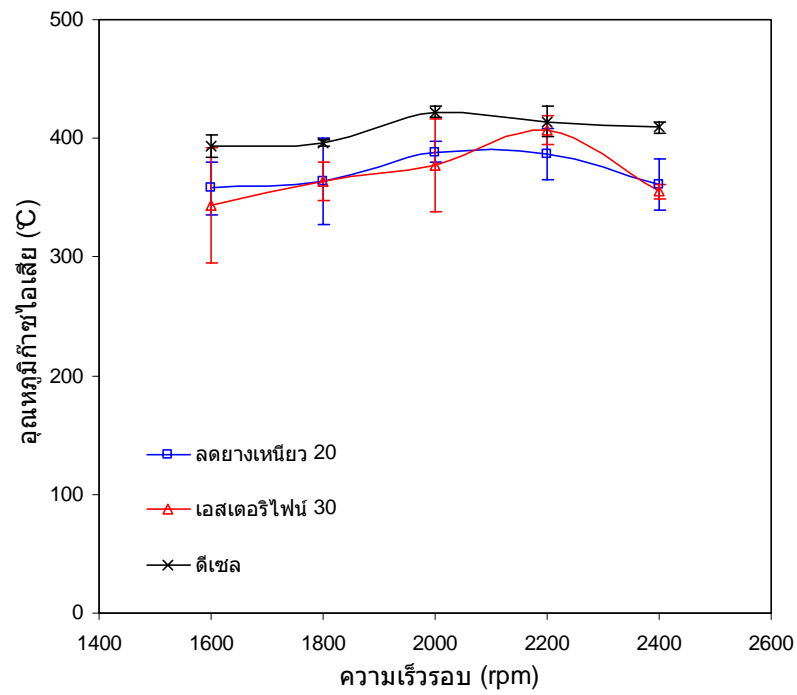
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย เป็นข้อมูลชนิดหนึ่ง ที่สามารถประมาณการอุณหภูมิห้องเผาไหม้ และใช้ทำนายสัดส่วนการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงในการสันดาป อุณหภูมิก๊าซไอเสียเมื่อเดิน เครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระ โหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm แสดงดังรูปที่ 4.46-4.47 ตามลำดับ

สำหรับการเดินเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระ โหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm รูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อภาระ โหลด เมื่อพิจารณา ร่วมกับอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และสัดส่วนก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ใน ไอเสีย พบว่า ข้อมูลทั้งหมดให้ผลสอดคล้องกัน สาเหตุสำคัญเกิดจาก เครื่องยนต์ต้องการพลังงาน จากเชื้อเพลิง เพิ่มมากขึ้นตามภาระ โหลด ส่งผลให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนใน ไอเสียจำนวนมากถูกใช้ ในการสันดาป สัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียจึงลดลง ขณะที่สัดส่วนก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ใน ไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้น

ส่วนการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm รูปที่ 4.47 จะเห็น ได้ว่า อุณหภูมิก๊าซไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบในช่วงแรก และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ ความเร็วรอบ 2,000 ถึง 2,200 rpm เมื่อความเร็วรอบสูงกว่า 2,200 rpm อุณหภูมิก๊าซไอเสียกลับมีค่า



รูปที่ 4.46 อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.47 อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (เดินเครื่องเต็มกำลัง)

ลดลง ลักษณะการเผาไหม้ตามทฤษฎี การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงสุด คือ การเผาไหม้สมบูรณ์ (stoicheometric) ซึ่งมีสัดส่วนการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงถูกต้องตามทฤษฎี ดังนั้นการเผาไหม้ในช่วงความเร็วรอบ 2,000 ถึง 2,200 rpm จึงใกล้เคียงการเผาไหม้สมบูรณ์มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด พบว่า ลดขยงเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 มีอุณหภูมิก๊าซไอเสียต่ำกว่า ดีเซลเฉลี่ย 8.72 และ 9.26% ตามลำดับ

4.7.6 แรงบิดและกำลังเบรค

เมื่อเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm ผลแรงบิดและกำลังเบรคของเครื่องยนต์ที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 4.48-4.49 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบทั้งหมด เครื่องยนต์มีแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,800 rpm ถ้าเดินเครื่องยนต์ต่างจากความเร็วรอบดังกล่าวแรงบิดเครื่องยนต์จะมีค่าลดลง โดยเฉพาะเมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเพิ่มขึ้น แรงบิดเครื่องยนต์จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับกำลังเบรคเครื่องยนต์ กำลังเบรคเครื่องยนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบเครื่องยนต์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะทั่วไปของเครื่องยนต์ดีเซล

อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.48-4.49 สิ่งสำคัญกว่านั้นจะเห็นได้ว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วย เอสเตอร์ไฟน์ 30 ให้แรงบิดและกำลังเบรคสูงสุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงทดสอบอีก 2 ชนิด โดยตลอดช่วงความเร็วรอบที่ทดสอบ เครื่องยนต์ที่เดินด้วย เอสเตอร์ไฟน์ 30 ให้แรงบิดและกำลังเบรคใกล้เคียงกันมากกับการเดินเครื่องยนต์ด้วย ลดขยงเหนียว 20 แต่ก็สูงกว่าเล็กน้อย (ไม่เกิน 1.2%) และให้แรงบิดและกำลังเบรคสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซลประมาณ 2.8-7.0% โดยความแตกต่างมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดขยงเหนียว 20 ให้แรงบิดและกำลังเบรคสูงกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลประมาณ 1.9-5.9% และมีค่าลดลงเมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งงานวิจัยบางชิ้นก็พบข้อสรุปเช่นเดียวกัน (คณิต และ เทิดศักดิ์, 2547)

สาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เครื่องยนต์ที่เดินด้วย เอสเตอร์ไฟน์ 30 และ ลดขยงเหนียว 20 สามารถสร้างแรงบิดและกำลังเบรคสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล เนื่องมาจากเชื้อเพลิงดังกล่าวมีความหนาแน่นสูงกว่าดีเซล จนส่งผลให้เครื่องยนต์ฉีดเชื้อเพลิงเชิงมวลและเชิงพลังงานสูงกว่าการฉีดดีเซล จากข้อมูลอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงทดสอบเมื่อเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm รูปที่ 4.41 จะสังเกตเห็นผลที่สอดคล้องกับข้อสันนิษฐานข้างต้นว่า ตลอดช่วงความเร็วรอบที่เดินเครื่องยนต์ด้วย เอสเตอร์ไฟน์ 30 อัตราการฉีดเชื้อเพลิงเชิงมวลมีค่าสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล 4.8-11.1% เมื่อคิดเป็นพลังงานอัตรา

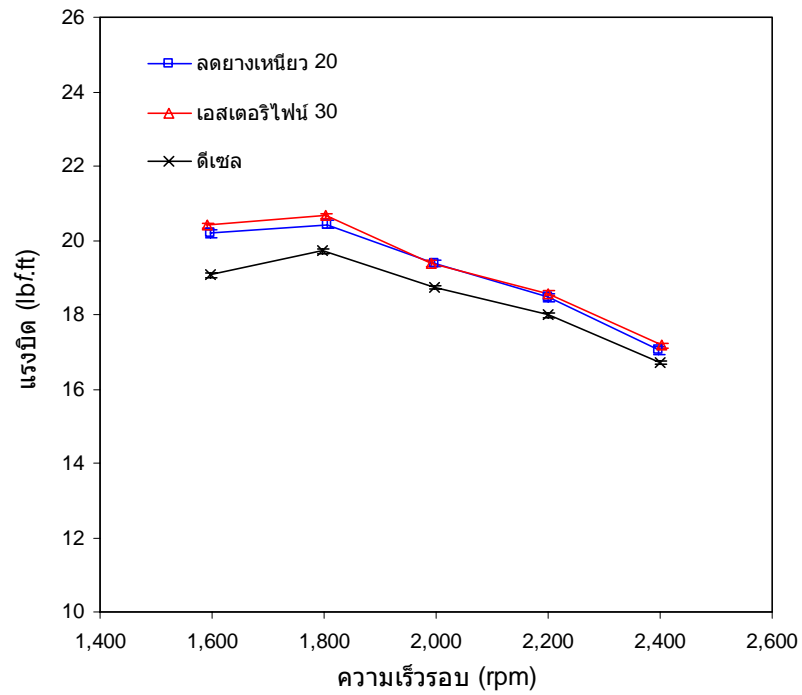
การฉีดเชื้อเพลิงเชิงพลังงานสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล 1.0-7.0% (ความแตกต่างลดลงเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น) ในทำนองเดียวกัน การเดินเครื่องยนต์ด้วย ลดยางเหนียว 20 มีอัตราการฉีดเชื้อเพลิงเชิงมวลสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล 3.2-9.6% และมีอัตราการฉีดเชื้อเพลิงเชิงพลังงานสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์ด้วยดีเซล 0.9-5.8% (ความแตกต่างลดลงเมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น) ด้วยเหตุนี้การเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังด้วย เอสเตอร์ไฟน์ 30 และ ลดยางเหนียว 20 จึงให้แรงบิดและกำลังเบรกสูงกว่าการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังด้วยดีเซล

4.7.7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ

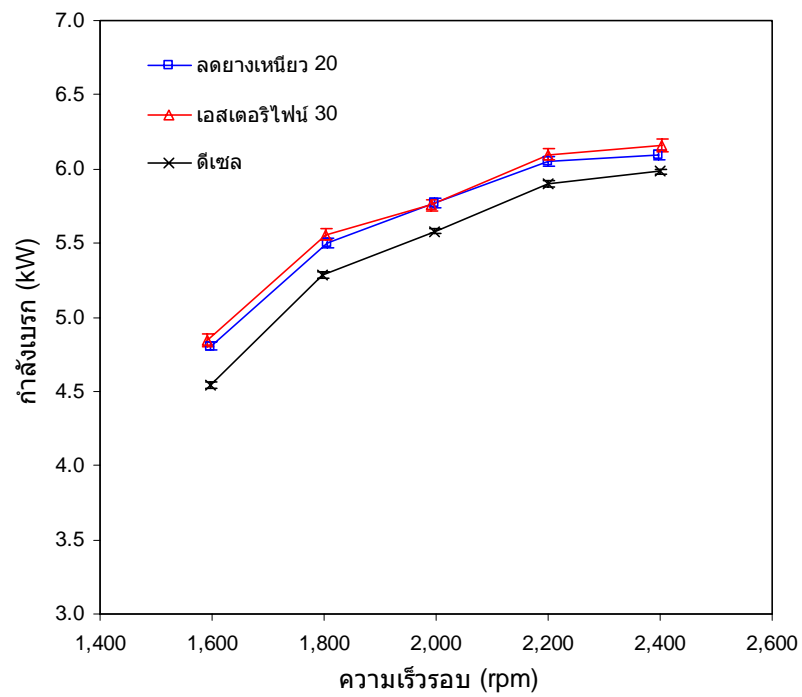
ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ตัวแปรที่ใช้บ่งบอกประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงไปเป็นงานที่ใช้ประโยชน์มีอยู่ 2 ตัวแปร คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค โดยอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะเป็นตัวแปรที่มีหน่วย เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป เช่น การคำนวณความต้องการเชื้อเพลิงสำหรับเดินเครื่องยนต์ให้ได้กำลังเบรคตามต้องการในเวลาที่กำหนด ส่วนประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคเป็นตัวแปรพื้นฐานที่ไม่มีหน่วย นิยมใช้เป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบเชิงทฤษฎี

สำหรับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะเมื่อเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm แสดงดังรูปที่ 4.50 และ 4.51 ตามลำดับ สำหรับการเดินเครื่องยนต์ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงภาระโหลด รูปที่ 4.50 ที่ภาระโหลดต่ำ เชื้อเพลิงทั้งหมดมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะสูงมาก แต่มีค่าลดลงเมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น

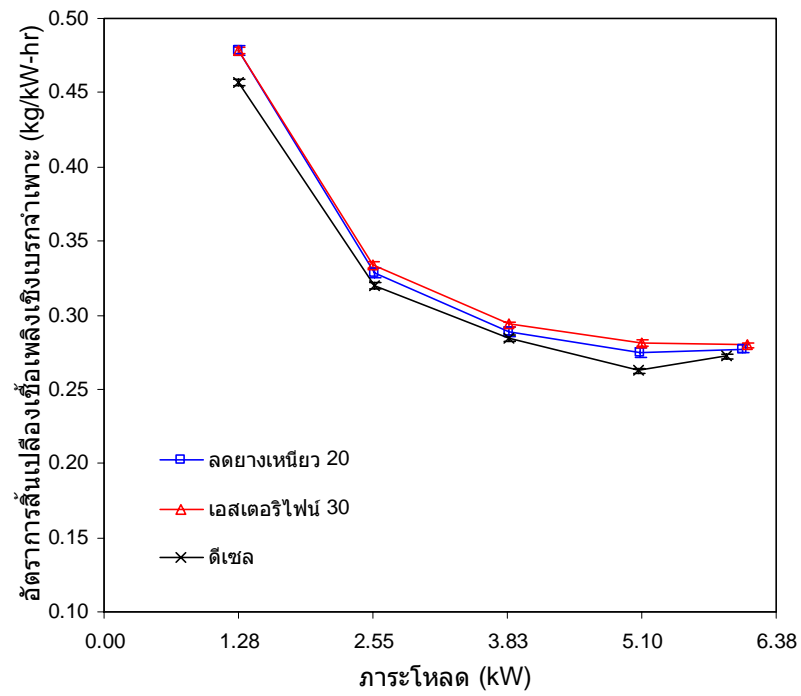
ส่วนการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลัง ที่ความเร็วรอบ 1,600-2,000 rpm รูปที่ 4.51 เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลอย่างเห็นได้ชัด แต่ที่ความเร็วรอบสูงกว่า 2,000 rpm อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะของเชื้อเพลิงทดสอบมีค่าใกล้เคียงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 3 ชนิด เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 2.29 และ 3.11% ตามลำดับ



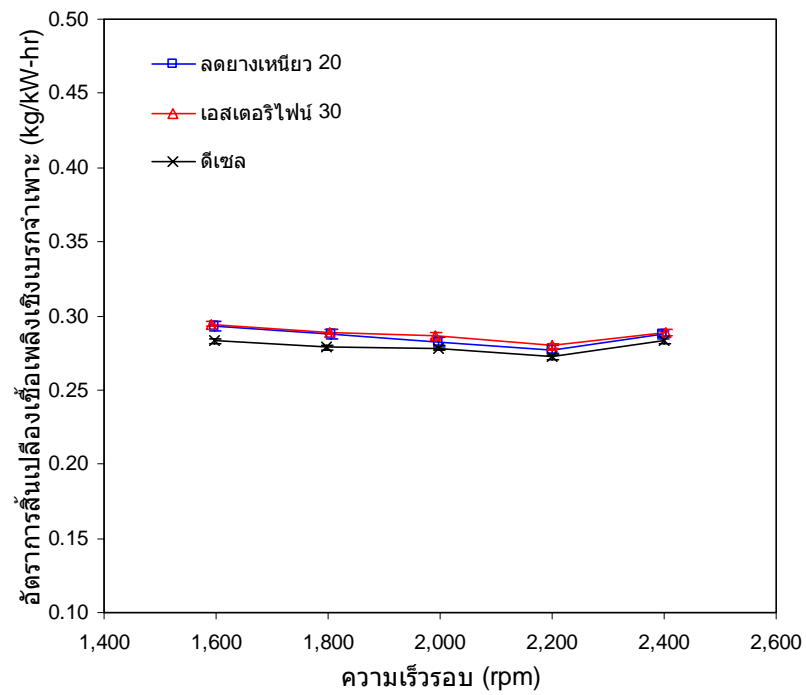
รูปที่ 4.48 แรงบิดของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)



รูปที่ 4.49 กำลังเบรคของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)



รูปที่ 4.50 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.51 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)

4.7.8 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค

ในส่วนของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ สำหรับการเดินเครื่องยนต์ ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงภาระโหลด รูปที่ 4.52 จะเห็นได้ว่า เมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้นตาม โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์มีค่าสูงที่สุดที่ภาระโหลด 5.1 kW

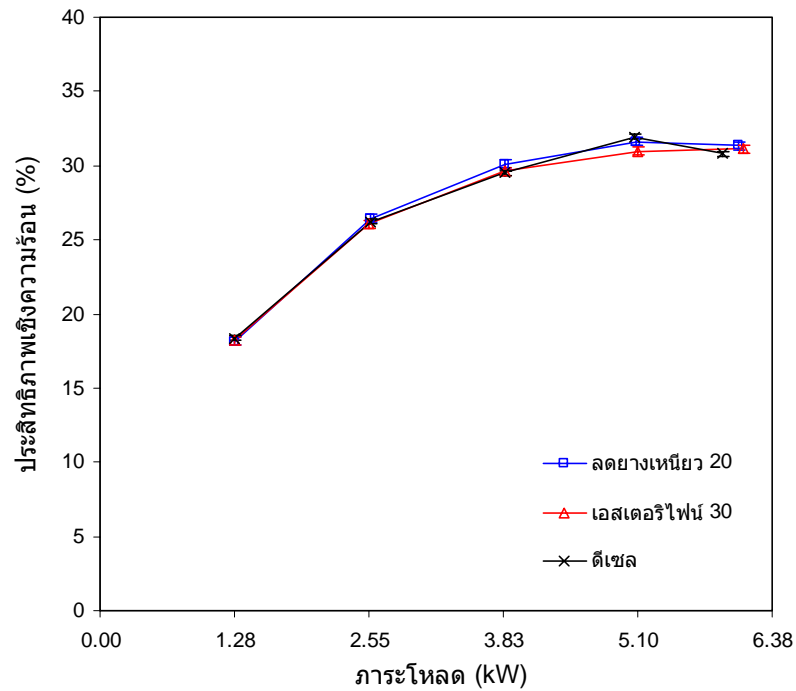
ส่วนการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm รูปที่ 4.53 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ ซึ่งที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์มีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงทดสอบทั้ง 3 ชนิด เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอรีไฟน์ 30 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 1.31 และ 0.66% ตามลำดับ

โดยทั่วไปประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ดีเซลจะขึ้นกับ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1. วัฏจักรอากาศมาตรฐาน 2. ลักษณะห้องเผาไหม้ หัวฉีด และระบบต่างๆ ของเครื่องยนต์ และ 3. พฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

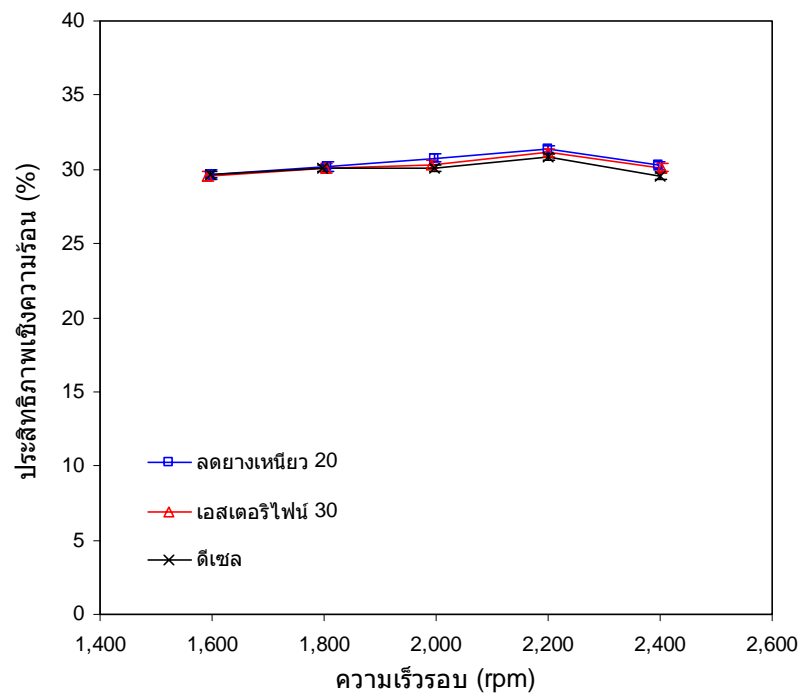
พฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดในเครื่องยนต์ ปัจจัยนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ได้แก่ ค่าซีเทน ความหนืด และสัดส่วนอะตอมออกซิเจนในเชื้อเพลิง

เมื่อพิจารณาคูสมบัตค่าซีเทน เชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนสูง ระยะการหน่วงเวลาของการจุดระเบิด (ignition delay period) ต่ำ เชื้อเพลิงสามารถจุดระเบิดได้รวดเร็วเมื่อถูกสูบเคลื่อนที่ถึงจุดศูนย์ตายบน (top dead center) ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์สูงขึ้น สำหรับเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูง เมื่อนิดเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะกระจายตัวในอากาศได้ไม่ดี เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ลดลง ส่วนสัดส่วนอะตอมออกซิเจนในเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาลักษณะการฉีดเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศได้ดีเฉพาะพื้นที่ผิวภายนอกเชื้อเพลิงเท่านั้น ถ้าเชื้อเพลิงมีอะตอมออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ อะตอมออกซิเจนจะช่วยสันดาปภายในเชื้อเพลิง ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์

สำหรับ ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอรีไฟน์ 30 เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนสูงกว่าดีเซล ประมาณ 4.8-9.8 แต่มีความหนืดสูงกว่าดีเซล 2.01 และ 2.61 cSt ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ความหนืดจะสูงกว่าดีเซล แต่ความหนืดก็ยังผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร (ตารางที่ 4.15) เมื่อพิจารณาสัดส่วนโดยมวลของอะตอมออกซิเจนในเชื้อเพลิง (ตารางที่ 4.6) พบว่า ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอรีไฟน์ 30 มีสัดส่วนโดยมวลของอะตอมออกซิเจนสูงกว่าดีเซลถึง 6.38 และ 7.57 ตามลำดับ



รูปที่ 4.52 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.53 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)

ด้วยเหตุผลข้างต้น คาดว่าอิทธิพลค่าซีเทน และสัดส่วนโดยมวลของอะตอมออกซิเจนสามารถเอาชนะอิทธิพลความหนืด ของเชื้อเพลิงทดสอบ จึงมีความเป็นไปได้ที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคของ ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 สูงกว่าดีเซล

4.7.9 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสีย

ในส่วนของก๊าซพิษจากท่อไอเสีย งานวิจัยนี้ได้ทดสอบก๊าซพิษจากท่อไอเสีย 2 ชนิด ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งก๊าซพิษทั้ง 2 ชนิด เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียเมื่อเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm แสดงดังรูปที่ 4.54-4.55

สำหรับการเดินเครื่องยนต์ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm รูปที่ 4.54 ที่ภาระโหลดต่ำ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียมีค่าสูงเล็กน้อย สาเหตุสำคัญเกิดจาก การฉีดเชื้อเพลิงเป็นละอองยังทำได้ไม่ดี เชื้อเพลิงที่ถูกฉีด ระเหยกลายเป็นไอน้ำได้น้อย เนื่องจากอุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่ำ อุณหภูมิห้องเผาไหม้สังเกตได้จากอุณหภูมิก๊าซไอเสีย (รูปที่ 4.46) เมื่อภาระโหลดสูงขึ้นเล็กน้อย อุณหภูมิห้องเผาไหม้มีค่าสูงขึ้น เชื้อเพลิงระเหยกลายเป็นไอได้ดีขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น (ประสิทธิภาพการเผาไหม้สังเกตได้จาก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค รูปที่ 4.52) ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียจึงลดลง แต่ที่ภาระโหลดสูง ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียกลับมีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจาก เครื่องยนต์ต้องการพลังงานจากเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นตามภาระโหลด หัวฉีดจึงต้องฉีดเชื้อเพลิง ปริมาณเพิ่มขึ้น การฉีดเชื้อเพลิงปริมาณมาก เชื้อเพลิงกระจายตัวเป็นละอองในอากาศได้ไม่ดี ก่อให้เกิด rich zone (เชื้อเพลิงที่หัวฉีดฉีดหนาแน่น และกระจายตัวไม่ดี) ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Leevijit and Prateepchaikul, 2011)

ส่วนการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm รูปที่ 4.55 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียมีลักษณะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น โดยปริมาณ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียมีค่าต่ำสุดในช่วงความเร็วรอบ 2,000 ถึง 2,200 rpm ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ที่พบว่า ช่วงความเร็วรอบดังกล่าว อุณหภูมิก๊าซไอเสียมีค่าสูงที่สุด และใกล้เคียงการเผาไหม้สมบูรณ์มากที่สุด (รูปที่ 4.47) เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด พบว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 20.75 และ 17.74% ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบ

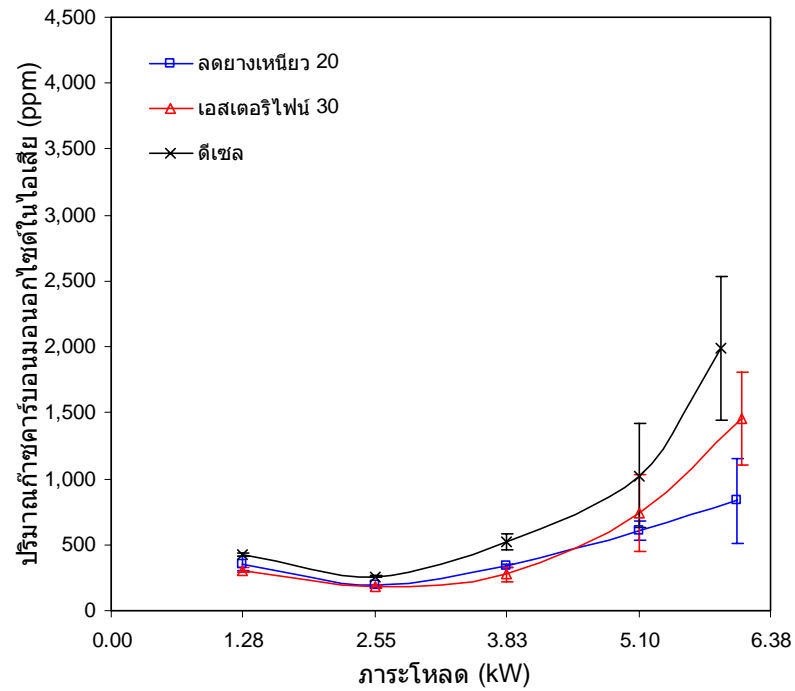
ดังกล่าว สอดคล้องกับการทบทวนเอกสารงานวิจัย ที่รายงานว่า การใช้ไบโอดีเซลทดแทนดีเซลในเครื่องยนต์ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสีย เนื่องจากไบโอดีเซลมีสัดส่วนอะตอมออกซิเจนในเชื้อเพลิงสูงกว่าดีเซล (Young, 2011; Xue et al., 2011) เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 ก็มีสัดส่วนอะตอมออกซิเจนในเชื้อเพลิงสูงกว่าดีเซลด้วยเช่นกัน

4.7.10 ปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสีย

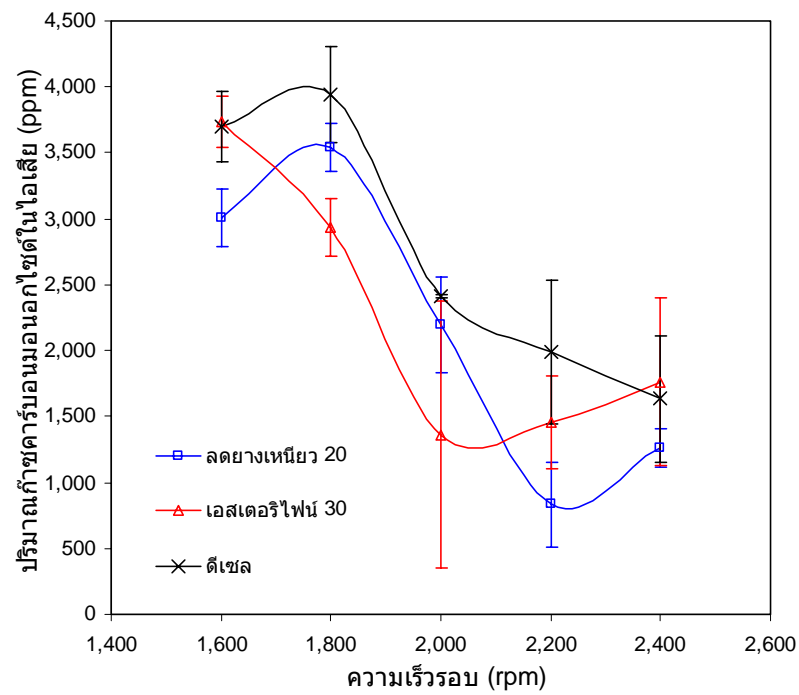
โดยทั่วไปการเกิดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนขึ้นกับอุณหภูมิการเผาไหม้ และความเข้มข้นของออกซิเจนในการสันดาป แต่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล การเกิดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนขึ้นกับปริมาณ *fire zone* (พื้นที่เฉพาะการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้) เป็นหลัก (Leevijit and Prateepchaikul, 2011) งานวิจัยนี้ทดสอบก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสีย (NO_x) ซึ่งเป็นผลรวมของ ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2)

การเดินเครื่องยนต์ด้วยเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm มีปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสีย แสดงดังรูปที่ 4.56-4.57 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระโหลดและความเร็วรอบอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อภาระโหลดและความเร็วรอบสูงขึ้น หัวฉีดต้องฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.40-4.41) ก่อให้เกิดปริมาณการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้สูง ส่งผลให้ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

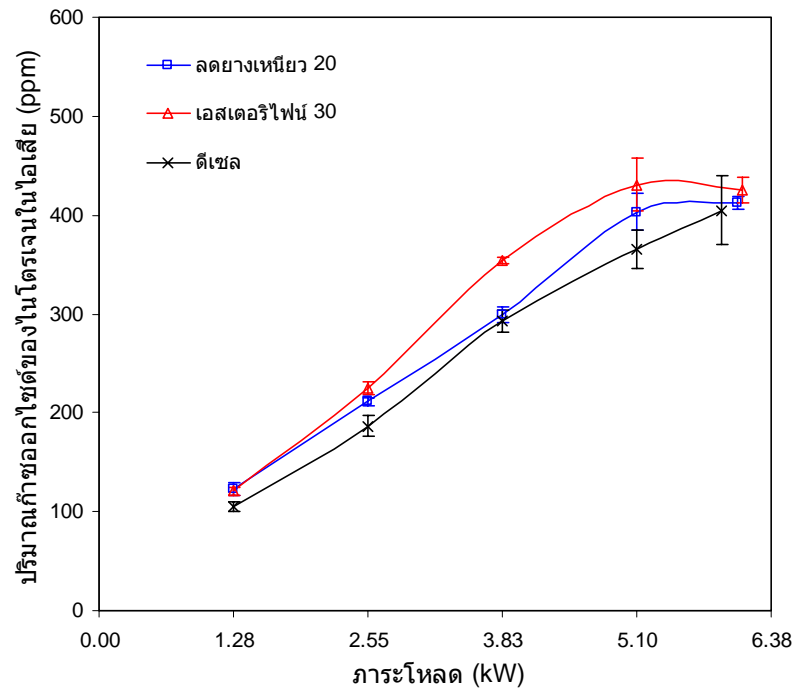
เมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงทดสอบ 3 ชนิด ด้วยวิธีการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm พบว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 มีปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 6.35 และ 11.21% ตามลำดับ ผลการทดสอบดังกล่าว สอดคล้องกับการทบทวนเอกสารงานวิจัย ที่รายงานว่า การใช้ไบโอดีเซลทดแทนดีเซลมีปริมาณการปล่อยก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีสัดส่วนอะตอมออกซิเจนในเชื้อเพลิงสูงกว่าดีเซล (Young, 2011; Xue et al., 2011) จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ลดยางเหนียว 20 และ เอสเตอร์ไฟน์ 30 ก็มีสัดส่วนอะตอมออกซิเจนในเชื้อเพลิงสูงกว่าดีเซลด้วยเช่นกัน



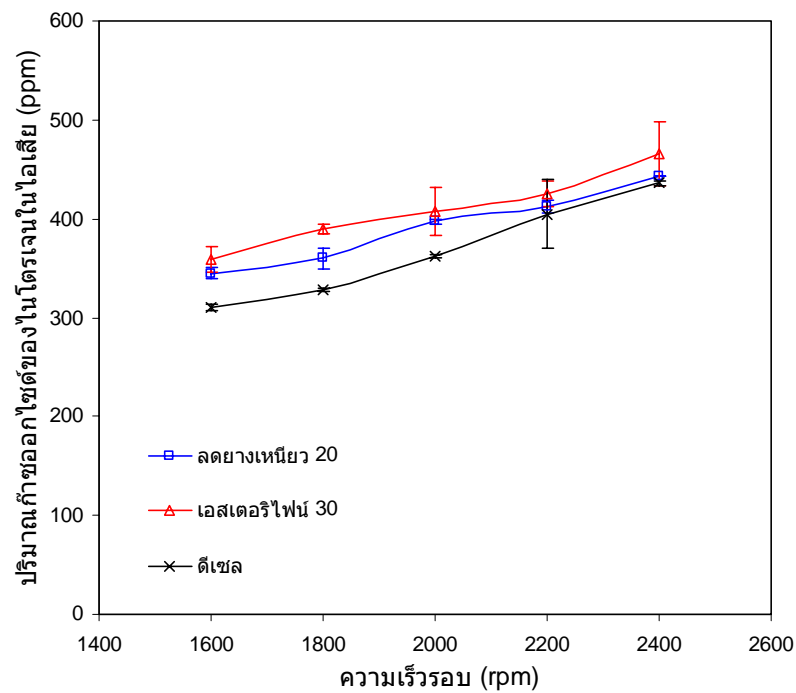
รูปที่ 4.54 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.55 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)



รูปที่ 4.56 ปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียของเครื่องยนต์ (ความเร็วรอบ 2,200 rpm)



รูปที่ 4.57 ปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียของเครื่องยนต์ (เดินเครื่องเต็มกำลัง)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 การผลิตเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและต้นทุน

การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตและต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบเอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ สรุปได้ว่า เชื้อเพลิงทั้งหมดผลิตได้ง่าย มีกระบวนการไม่ซับซ้อน และไม่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว มีจุดเด่นที่สำคัญ คือ ใช้สารเคมีน้อยที่สุด สำหรับต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทั้งหมดมีราคา ๓๓.๗๗ 43.01 ๓๓.๕๕ และ 35.6๓ บาท/ลิตร ตามลำดับ

5.1.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิง

การศึกษาองค์ประกอบเชื้อเพลิง สรุปได้ว่า เชื้อเพลิงทุกชนิดที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมมีชนิดกรดไขมันเหมือนกัน โดยมีสูตรโมเลกุลเฉลี่ยเป็น $C_{16.93}H_{34.66}O$ อย่างไรก็ตาม ชนิดกรดไขมันเหล่านี้จะจับตัวเป็นองค์ประกอบที่ไม่เหมือนกัน สำหรับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ มีองค์ประกอบแตกต่างกัน และมีสูตรโมเลกุลเฉลี่ยไม่เหมือนกัน ดังนี้ $C_{47.7}H_{99}O_{5.4}$ $C_{50.9}H_{94.7}O_{5.79}$ $C_{43.31}H_{90}O_{4.93}$ และ $C_{17.99}H_{34.77}O$ ตามลำดับ

5.1.3 ความหนืดจลศาสตร์

การทดสอบความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล ที่สัดส่วนการผสมต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 40-90°C ด้วยอุปกรณ์วัดความหนืด และอ่างควบคุมอุณหภูมิ สรุปได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 40°C (ASTM D445) น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ มีความหนืดจลศาสตร์ 41.1 37.๓ 3.9 และ 5.05 cSt ตามลำดับ เมื่อสร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงทุกชนิดที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ พบข้อสรุปดังนี้ ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 40°C เชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด ไม่ผ่านมาตรฐานดีเซลทั้งหมด ยกเว้นเมทิลเอสเทอร์ ผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตรและดีเซลหมุนช้า แต่ไม่ผ่านมาตรฐาน

ดีเซลหมุนเร็ว เมื่อพิจารณาสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตรและดีเซลหมุนช้า พบว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด ผสมในดีเซลสูงสุด 46 3 และ 36 vol.% ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด โดยที่ความหนืดจลศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว สรุปได้ว่า เมทิลเอสเทอร์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด ผสมในดีเซลสูงสุด 57 13 10 และ 10 vol.% ตามลำดับ

5.1.4 ความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซลที่สัดส่วนการผสมต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 15.6-100°C ด้วยอุปกรณ์ Picanometer และเครื่องชั่งน้ำหนัก สรุปได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 15.6°C น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ และเมทิลเอสเทอร์ มีความหนาแน่น 931 93 และ 915 และ 914 kg/m³ เรียงจากมากไปน้อย ตามลำดับ เมื่อสร้างสมการทำนายสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ ได้ข้อสรุปดังนี้ ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 15.6°C เมทิลเอสเทอร์ ผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตรและดีเซลหมุนช้า ขณะที่น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ ผ่านเฉพาะมาตรฐานดีเซลหมุนช้า สำหรับสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดที่ความหนาแน่นผ่านมาตรฐาน น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด 7 และ 67 และ 67 vol.% ตามลำดับ โดยที่เชื้อเพลิงผสมผ่านมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร สำหรับมาตรฐานดีเซลหมุนช้า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด 9 vol.% เท่ากัน ส่วนมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว เมทิลเอสเทอร์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียวและลดกรด มีสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุด 71 4 และ 36 และ 36 vol.% ตามลำดับ

5.1.5 การไม่เป็นไอของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล

จากการศึกษาคุณลักษณะการไม่เป็นไอของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล โดยบรรจุเชื้อเพลิงทดสอบในกระบอกตวงขนาด 100 ml ปิดฝาป้องกันสิ่งปนเปื้อนวางไว้ในบรรยากาศปกติ จนการเป็นไอเข้าสู่สภาวะคงตัว สรุปได้ว่า เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมัน

ปาล์มดิบหีบรวมไม่เป็นไข ส่วนน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียว และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรด สามารถผสมในดีเซลได้สูงสุดที่ 30 [0] และ 10 vol.% ตามลำดับ โดยที่เชื้อเพลิงผสมไม่เป็นไข นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไขสูงสุดของเชื้อเพลิงผสมกับ ตัวแปรบ่งชี้การมีอยู่ขององค์ประกอบต่างๆ ในเชื้อเพลิง ได้ข้อสรุปเงื่อนไขที่บ่งบอกได้ว่า สำหรับเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซล เชื้อเพลิงผสมจะไม่เป็นไขถ้า $TG - [E - 75FFA - 0.5DG - 11.64] \leq 0$ เมื่อ TG [E FFA และ DG คือ สัดส่วนของ ไตรกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเตอริ์ กรดไขมันอิสระ และไดกลีเซอไรด์ ในเชื้อเพลิงผสม (wt.%) ตามลำดับ ข้อสรุปนี้บ่งชี้ให้ทราบว่า ไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบที่ส่งเสริมการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ช่วยยับยั้งการเป็นไข โดยความสามารถในการยับยั้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวโมเลกุลที่สั้นลง ซึ่งองค์ความรู้ที่ค้นพบนี้มีประโยชน์มากสำหรับการพัฒนาส่วนผสมดีเซลต้นทุนต่ำจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

5.1.6 การทดสอบสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์การเกษตรจากการเลือกเชื้อเพลิงผสม

เมื่อนำเชื้อเพลิงผสม [ชนิด] ที่น่าสนใจ และผ่านการศึกษาการผลิตและต้นทุน คุณลักษณะ ความหนืด ความหนาแน่น และการไม่เป็นไข ได้แก่ น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวผสมในดีเซล [0] vol.% (ลดขางเหนียว [0]) และน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอรีไฟน์ผสมในดีเซล 30 vol.% (เอสเตอรีไฟน์ 30) ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรระยะสั้นเปรียบเทียบกับดีเซล ด้วยเครื่องยนต์การเกษตรยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT [0] ด้วยวิธีการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600- [400] rpm ผลการทดสอบ พบว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วย ลดขางเหนียว [0] และ เอสเตอรีไฟน์ 30 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 5.74 และ 7.31% มีสัดส่วนก๊าซออกซิเจนในไอเสียน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 17.6 [และ 16.3 [มีสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 4.56 และ 4.00% มีอุณหภูมิก๊าซไอเสียต่ำกว่าดีเซลเฉลี่ย [7 [และ 9. [6% มีแรงบิดมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 3.57 และ 4.36% มีกำลังเบรคมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 3.43 และ 4. [1% มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรคจำเพาะมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย [[9 และ 3.11% มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 1.31 และ 0.66% มีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย [0.75 และ 17.74% และมีปริมาณก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสียมากกว่าเครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซลเฉลี่ย 6.35 และ 11. [1% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา ต้นทุนดีเซลและน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม การผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลองค์ประกอบเชื้อเพลิงผสม ผลการศึกษาคุณลักษณะการเป็นของเหลวที่สำคัญ 3 ประเภท ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น และการเป็นไข ของเชื้อเพลิงผสม และการเลือกเชื้อเพลิงผสมและการทดสอบเครื่องยนต์การเกษตร พบข้อเสนอแนะต่างๆ ดังนี้

สำหรับผู้สนใจการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (หัวข้อ 3.1) ควรจะศึกษา ผลต่างราคาขายปลีกดีเซลหน้าปั๊มกับราคาขายน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมในปัจจุบัน (รูปที่ 4.6) เนื่องจากผลต่างราคาดังกล่าวมีความไม่แน่นอนอื่น อีกทั้งผู้บริโภคทั่วไปมีเป้าหมายหลัก คือ ลินค้าราคาต่ำ

เมื่อวิเคราะห์การผลิต ต้นทุน และองค์ประกอบเชื้อเพลิงผสม ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เอสเตอร์รีไฟน์ พบว่า การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอร์รีไฟน์ ด้วยเมทานอลจำนวน 0 vol.% ของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเริ่มต้น น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอร์รีไฟน์มีองค์ประกอบโมเลกุลเมทิลเอสเตอร์สูงถึง 3 wt.% (ตารางที่ 4.4) จากปริมาณเมทิลเอสเตอร์ดังกล่าว คาดว่า เมทานอลบางส่วนไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเปลี่ยนองค์ประกอบโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเตอร์ (รูปที่ 4.5) ทำให้ไตรกลีเซอไรด์มีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอร์รีไฟน์ไม่ต้องการลดปริมาณไตรกลีเซอไรด์ แต่ต้องการลดปริมาณกรดไขมันอิสระโดยเฉพาะ ด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันระหว่างเมทานอลกับกรดไขมันอิสระ เปลี่ยนองค์ประกอบโมเลกุลกรดไขมันอิสระเป็นเมทิลเอสเตอร์ (รูปที่ 4.7) ดังนั้นการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอร์รีไฟน์จึงมีความเป็นไปได้ที่จะลดสัดส่วนเมทานอลในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ สามารถติดตั้งชุดควบแน่นเมทานอล เพื่อควบแน่นเมทานอลส่วนเกิน ประกอบด้วย เมทานอลบางส่วนที่ระเหยออกไประหว่างทำปฏิกิริยา และเมทานอลบางส่วนที่ตกค้างในน้ำมัน น้ำ กรด และกลีเซอรอล หลังการทำปฏิกิริยา (นิโอะ, 55) ซึ่งวิธีการดังกล่าวส่งผลให้ต้นทุนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอร์รีไฟน์ และเมทิลเอสเตอร์ลดลง

การศึกษากการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม เมื่อสังเคราะห์เงื่อนไขการไม่เป็นไขของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมผสมในดีเซลในทอมการมีอยู่ของไตรกลีเซอไรด์ เมทิลเอสเตอร์ กรดไขมันอิสระ และไดกลีเซอไรด์ (รูปที่ 4.39) จะเห็นได้ว่า สามารถพิสูจน์เงื่อนไขร่วมของเชื้อเพลิงผสมที่ไม่เป็นไขได้ชัดเจน แต่ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมได้ (พื้นที่ด้านขวาของกราฟ) เนื่องจากยังมีตัวแปรที่มีผลต่อการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสมอีกหลายปัจจัยที่ไม่ได้ศึกษา โดยเฉพาะคุณสมบัติความสะอาดของเชื้อเพลิง ซึ่งคาดว่าเชื้อเพลิงที่ไม่สะอาด

อาจจะส่งเสริมการเป็นไขของเชื้อเพลิง เช่น เชื้อเพลิงที่มียางเหนียว หรือ ตะกอน ปะปนอยู่ในเชื้อเพลิงปริมาณมาก เมื่อพิจารณาสัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยที่เชื้อเพลิงผสมมีความหนืด และความหนาแน่นผ่านมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ และไม่เป็นไข (ตารางที่ 4.1 □ และ 4.13) จะเห็นได้ว่า สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดถูกจำกัดด้วยการเป็นไขเป็นหลัก ถ้าสามารถแก้ปัญหาการเป็นไขได้ จะส่งผลให้สัดส่วนการผสมในดีเซลสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อสังเกตการณ์การผลิตเชื้อเพลิง และการทดสอบการเป็นไขของเชื้อเพลิงผสม พบว่าการเป็นไขของเชื้อเพลิงสามารถแก้ปัญหา ก่อนนำไปใช้ในเครื่องยนต์ด้วยวิธีดังนี้ 1. ผสมดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มมากขึ้น เพื่อเจือจางองค์ประกอบโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ที่มีส่วนส่งเสริมการเป็นไขของเชื้อเพลิง □ แยกเฉพาะส่วนไขของเชื้อเพลิงผลิตเป็นเมทิลเอสเทอร์ เนื่องจากเมทิลเอสเทอร์ความบริสุทธิ์สูงกว่า 99 wt.% ไม่เป็นไข (ตารางที่ 4. □ และ 4.11) และเมทิลเอสเทอร์ยังเป็นองค์ประกอบโมเลกุลหนึ่งที่มีส่วนยับยั้งการเป็นไขของเชื้อเพลิง และ 3. อุ่นเชื้อเพลิงเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 40°C จนกระทั่งส่วนไขของเชื้อเพลิงละลายเป็นของเหลวทั้งหมด หลังจากนั้นนำเชื้อเพลิงไปใช้งาน

การเลือกเชื้อเพลิงผสมสำหรับทดสอบเครื่องยนต์การเกษตร เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงของ ลดยางเหนียว □ พบว่า มีค่าซีเทนสูงถึง 56. □ (ตารางที่ 4.15) ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานดีเซลทุกประเภทมาก เมื่อพิจารณาต้นทุนน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และเมทานอลในปัจจุบัน พบว่า น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมมีราคา 9.6 □ บาท/ลิตร (ราคาเฉลี่ยปี พ.ศ. ๒54 รูปที่ ๒5) ส่วนเมทานอลมีราคา 3.90 บาท/ลิตร (ข้อมูลคำนวณจาก ภาคผนวก ข และ ค) จะเห็นได้ว่า เมทานอลมีราคาต่ำกว่าน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม เมทานอลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง มีคุณสมบัติเด่นชัด คือ ความหนืดและค่าซีเทนต่ำ เพราะฉะนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถผลิตเชื้อเพลิงผสม ด้วยการนำเมทานอลผสมในเชื้อเพลิง วิธีดังกล่าวจะช่วยลดต้นทุนและลดความหนืดของเชื้อเพลิงผสม แต่ทั้งนี้คุณสมบัติค่าซีเทนของเชื้อเพลิงผสมต้องผ่านมาตรฐานดีเซลด้วย อย่างไรก็ตาม การผสมเมทานอลในเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งก่อให้เกิดกลีเซอรอลในเชื้อเพลิง (รูปที่ ๒) วิธีนี้สามารถแก้ไขด้วยการศึกษา สัดส่วนผสมเมทานอลในเชื้อเพลิงต่ออัตราการเกิดกลีเซอรอลของเชื้อเพลิงผสมที่อุณหภูมิถังเก็บเชื้อเพลิง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับคุณสมบัติกลีเซอรอลตามมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร เพื่อกำหนดอายุการใช้งานของเชื้อเพลิง (กลีเซอรอลไม่มากเกินไป) แต่ด้วยเหตุผลใดก็ตาม ถ้าเชื้อเพลิงมีปริมาณกลีเซอรอลอยู่เล็กน้อย แต่

ไม่มากพอสำหรับการจับตัวเป็นของแข็งในเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงเหล่านั้นก็สามารถใช้ได้เช่นกัน เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง

เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติค่ากรดของเชื้อเพลิงทดสอบ พบว่า ลดยางเหนียว □ มีค่ากรด 4.97 mgKOH/g สูงกว่ามาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร อย่างไรก็ตาม ผลการพิสูจน์เชิงประจักษ์ด้วยการกักกรองแผ่นทองแดง ลดยางเหนียว □ กลับมีพฤติกรรมกักกรองแผ่นทองแดงเหมือนกับดีเซล (ตารางที่ 4.15) เมื่อพิจารณาค่ากรดตามมาตรฐานดีเซลเครื่องยนต์การเกษตร จะพบว่า เป็นการกำหนดค่ากรดสำหรับการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยเฉพาะ เพื่อให้เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการผลิตมีความบริสุทธิ์สูง เพราะฉะนั้น การผลิตเชื้อเพลิงสำหรับใช้งานในเครื่องยนต์มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตเชื้อเพลิงมีค่ากรดไม่สูงกว่า 4.97 mgKOH/g กล่าวคือ เชื้อเพลิงที่ถูกผลิตจะมีพฤติกรรมกักกรองเหมือนดีเซล วิธีดังกล่าวจะช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์รีไฟน์ เนื่องจากสามารถลดสัดส่วนเมทานอลในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (รูปที่ □7) แต่ทั้งนี้ค่ากรดของเชื้อเพลิงที่ถูกผลิตได้ต้องไม่สูงกว่า 4.97 mgKOH/g อย่างไรก็ตาม ค่ากรดดังกล่าว อาจไม่เหมาะสมสำหรับกรณีการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ด้วยปฏิกิริยา □ ขั้นตอน เนื่องจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขั้นตอนที่สองต่อจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนแรก ค่ากรดที่สูงของเชื้อเพลิงเริ่มต้น จะทำให้ปริมาณการได้คืนของเชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากการสูญเสียกรดไขมันอิสระในรูปสบู่ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น

สำหรับเชื้อเพลิงผสมที่ถูกเลือกทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์การเกษตรในงานวิจัยนี้ คือ ลดยางเหนียว □ และ เอสเทอร์รีไฟน์ 30 (ตารางที่ 4.1□) เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเชื้อเพลิง □ ชนิดนี้ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลยานพาหนะ หรือเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูง (มาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว) จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชื้อเพลิงทดสอบกับมาตรฐานดีเซลประเภทต่างๆ (ตารางที่ 4.15) จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิง □ ชนิดดังกล่าวมีคุณสมบัติความหนืด และกากถ่าน ไม่ผ่านมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว สำหรับคุณสมบัติความหนืด สามารถแก้ปัญหาด้วยการติดตั้งระบบอุ่นเชื้อเพลิงในถังเก็บ ซึ่งต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ ส่วนคุณสมบัติกากถ่าน ควรมีการศึกษาวิธีการลดปริมาณกากถ่านในเชื้อเพลิง ซึ่งต้องเพิ่มปริมาณสารเคมีบางชนิดในการผลิต (สารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยา หรือสารเคมีที่ใช้เป็นสารเติมแต่ง) อย่างไรก็ตาม หากสามารถปรับคุณสมบัติความหนืด และกากถ่าน ของ ลดยางเหนียว □ และ เอสเทอร์รีไฟน์ 30 ให้ผ่านมาตรฐานมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว จะทำให้เชื้อเพลิง □ ชนิดนี้ มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลยานพาหนะหรือเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูง

การทดสอบสมรรถนะ และการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์การเกษตร เมื่อสังเกต อุณหภูมิก๊าซไอเสีย รูปที่ 4.46 และ 4.47 พบว่า การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ด้วยการ เปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 1,600 rpm และการเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วง ความเร็วรอบ 1,600-1,400 rpm มีอุณหภูมิก๊าซไอเสียต่ำสุด ประมาณ 140°C (ที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm ภาระโหลด 1.0 kW) จากอุณหภูมิดังกล่าว สามารถคำนวณอัตราให้ความร้อนต่ำสุด สำหรับการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียอุ่นเชื้อเพลิงในถังเก็บ ซึ่งจะช่วยลดความหนืด และแก้ปัญหา การเป็นไขของเชื้อเพลิง โดยอัตราให้ความร้อนต่ำสุด สามารถใช้ออกแบบความจุถังเชื้อเพลิงที่ ควบคุมอุณหภูมิ (ความร้อนต่ำสุดที่ใช้อุ่นเชื้อเพลิงที่ถูกจำกัดปริมาณ) นอกจากนี้ ช่วงอุณหภูมิ ก๊าซไอเสียที่ศึกษา สามารถประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลออกแบบระบบถังเชื้อเพลิงคู่ (Dual) ของ เครื่องยนต์ ซึ่งใช้วิธีติดตั้งถังเก็บเชื้อเพลิง 2 ถัง ถังเก็บเชื้อเพลิงแรกบรรจุดีเซล หรือเชื้อเพลิงที่มี คุณสมบัติเหมาะสมและไม่เป็นไข ส่วนถังเก็บเชื้อเพลิงที่สองบรรจุเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติค่อนข้างดี แต่เชื้อเพลิงมีความหนืดสูง และเป็นไข เมื่อเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์ หรือการเดินเครื่องยนต์ในช่วง อุณหภูมิก๊าซไอเสียต่ำ ระบบจ่ายเชื้อเพลิง จะจ่ายเชื้อเพลิงจากถังเก็บแรก เมื่ออุณหภูมิก๊าซไอเสีย เครื่องยนต์สูงขึ้นและเพียงพอที่จะให้ความร้อนเชื้อเพลิงในถังเก็บที่สอง จนกระทั่งเชื้อเพลิงใน ถังเก็บที่สองมีความหนืดลดลง (ตารางที่ 4.5) และส่วนไขเชื้อเพลิงถูกละลายเป็นของเหลวทั้งหมด ระบบจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์จะเปลี่ยนไปจ่ายเชื้อเพลิงจากถังเก็บที่สอง ซึ่งวิธีการดังกล่าว เป็นวิธีการประยุกต์ดัดแปลงเครื่องยนต์ให้ใช้เชื้อเพลิงทดแทนดีเซลได้มากขึ้น โดยนำความร้อน จากก๊าซไอเสียที่สูงมาปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการทางความร้อน แทนการ ปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการเคมี ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงทดแทน ดีเซลให้ต่ำลง

เมื่อพิจารณาวัฏจักรคาร์บอนทั้งระบบ จะเห็นได้ว่า การใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืช ไม่มีส่วนเพิ่ม ปริมาณคาร์บอนในวัฏจักรหรืออากาศในบรรยากาศ เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของพืชช่วยดึง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศในบรรยากาศ ให้อยู่ในรูปผลผลิตของพืช ขณะที่จุลินทรีย์ บางชนิดสามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และ กรดแอซติก (กรดน้ำส้ม) เมื่อใช้ผลผลิตของพืชเป็นแหล่งพลังงาน หรือนำผลผลิตของพืชไป เผาไหม้ จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ กลับสู่อากาศในบรรยากาศ เช่นเดิม โดยภาพรวมของวัฏจักรคาร์บอน สรุปได้ว่า การใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืช หรือการปลูกพืช น้ำมันหมุนเวียน เป็นการหมุนเวียนคาร์บอนในวัฏจักร (Crisa and Purthy, 2010) ซึ่งแตกต่างจาก กรณี การใช้ดีเซล และเชื้อเพลิงฟอสซิลชนิดอื่นๆ ที่เพิ่มปริมาณคาร์บอนในวัฏจักร และต้องการ

เวลาหลายล้านปีเพื่อกลับสู่สภาพเดิม เพราะฉะนั้น หากสามารถผสมเชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชในดีเซล ได้มากขึ้น จะช่วยลดการเพิ่มคาร์บอนเข้าสู่วัฏจักรคาร์บอน

สำหรับข้อเสนอแนะทั้งหมดที่กล่าวมา โดยสรุป สามารถใช้เป็นแนวทางศึกษาต่อยอดความรู้ การผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลต้นทุนต่ำ จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม และการออกแบบหรือ การดัดแปลงเครื่องยนต์ให้ใช้เชื้อเพลิงทดแทนดีเซลได้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อ เศรษฐกิจ สังคม และประเทศชาติต่อไป

บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง. กระทรวงคมนาคม. สืบค้นจาก : <http://www.4x4.in.th/tchangwat.html> [29 ตุลาคม 2554]
- การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. สืบค้นจาก : <http://www.pttplc.com/en/news-energy-fact-oil-price-bangkok.aspx> [9 มกราคม 2555]
- กิตติศักดิ์ ทวีสิน โสภาก. 2549. การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม โดยใช้กระบวนการผลิตแบบ Esterification และ Tranesterification. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กำพล ประทีปชัยกูร และ ชีระยุทธ หลีวิจิตร. 2551. การใช้ น้ำมันปาล์มลดกัมลคกรดผสมกับดีเซล ในเครื่องยนต์การเกษตร: ส่วน I-สมรรถนะเครื่องยนต์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6. หน้าที่ 634-640.
- กำพล ประทีปชัยกูร และ ชีระยุทธ หลีวิจิตร. 2551. การใช้ น้ำมันปาล์มลดกัมลคกรดผสมกับดีเซล ในเครื่องยนต์การเกษตร: ส่วน II-การสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6. หน้าที่ 641-648.
- คณิต วัฒนวิเชียร และ เทอดศักดิ์ ชัยสุริยะพันธ์. 2547. Performance Deterioration and Durability of High speed IDI Engine with CPO Diesel. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18. ขอนแก่น. ประเทศไทย. 18-20 ตุลาคม 2547.
- คองหงษ์ สกษ.. กรมอุตุนิยมวิทยา. กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. สืบค้นจาก : <http://www.tmd.go.th/climate/climate.php> [9 มกราคม 2555]
- ค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ Ft. กลุ่มงานค่าไฟฟ้า. ฝ่ายเศรษฐกิจพลังงาน. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. สืบค้นจาก : <http://www2.egat.co.th/ft/> [29 ตุลาคม 2554]
- ฉกรรจ์ สังข์ทอง. 2550. ปาล์มน้ำมัน. สำนักพิมพ์ เซาท์เทิร์นเพรสแอนด์พับลิเคชั่น. สงขลา. หน้า 328.
- ชาคริต ทองอุไร สันหทัย กลิ่นพิกุล จรรย์ บุญกาญจน์ และพิมพ์พรรณ เกียรติชิมกุล. การผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน. สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืช น้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สืบค้นจาก: <http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/paper.php> [29 ตุลาคม 2554]

ชาคริต ทองอุไร สันหัชชัย กลิ่นพิกุล ชิต ลีมวรพันธ์ และเสถียร วาณิชวิริยะ. การวิจัยเพื่อแปรรูปน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องจักรกลการเกษตร. สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สืบค้นจาก : <http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/paper.php> [29 ตุลาคม 2554]

ทวีศักดิ์ ชัดติยวรรณ. 2554. การทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันดีเซลผสมน้ำมันปาล์มลดกำ-ลดกรด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธีระยุทธ หลีวิจิตร กำพล ประทีปชัยกูร และ ถนัด นิมพลี. 2551. สมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของการใช้น้ำมันปาล์มชนิดลดกำและลดกรดผสมกับดีเซลในเครื่องยนต์ยานพาหนะแบบ IDI. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. ปทุมธานี. ประเทศไทย. 15-17 ตุลาคม 2551.

นพพร เทนอิสสระ. 2546. การศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดโดยตรง โดยใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

นิโอะ ปูชู. 2552. การออกแบบและสร้างชุดควบคุมแน่นเมทานอลสำหรับระบบผลิตไบโอดีเซลชุมชน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. 2549. เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล (ไบโอดีเซลชุมชน). ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 123. ตอนพิเศษ 79 ง.

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. 2550. เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ไบโอดีเซลชุมชน). ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 124. ฉบับที่ 3. ตอนพิเศษ 62 ง.

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. 2554. เรื่อง กำหนดลักษณะคุณภาพน้ำมันดีเซล. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 128. ตอนพิเศษ 48 ง.

ภาษีค่าไฟฟ้าและน้ำประปา. สรรพากรสาส์น Plus ปีที่ 2 ฉบับที่ 11 เดือนเมษายน 2553. สืบค้นจาก : <http://www.pattanakit.net> [29 ตุลาคม 2554]

มณีชนก สุวรรณวงศ์. 2552. ตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำส้มควันไม้และเฟอร์ริกซัลเฟตบนผงถ่านกัมมันต์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- ราคากลางโยธาไทย. สืบค้นจาก : <http://www.xn--12cfk3im9ebc.com/taw-bwk-kha-khnsng> [29 ตุลาคม 2554]
- สวิตชาติ ญาณแก้ว. 2547. การทดสอบการใช้น้ำมันปาล์มลดกัมมลดกรด และเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์ม ทดแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องจักรกลทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สินินาฎ จงคง. 2549. การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันของส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2551. วารสารนโยบายพลังงาน. ฉบับที่ 81. กรกฎาคม-กันยายน. หน้า 36.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2553. รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2553. หน้า 30, 275-283.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2554. วารสารนโยบายพลังงาน. ฉบับที่ 91. มกราคม-มีนาคม. หน้า 9.
- สำนักงานส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร. กรมการค้าภายใน. กระทรวงพาณิชย์. สืบค้นจาก : <http://agri.dit.go.th> [9 มกราคม 2555]
- ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์. 2550. Biodiesel พลังงานทางเลือก. บริษัท มิตรภาพการพิมพ์ และสตีวดีโอ จำกัด. กรุงเทพมหานคร.
- ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. สืบค้นจาก: <http://it.doa.go.th/palm/linkTechnical/biodiesel.html> [29 ตุลาคม 2554]
- อัตราค่าน้ำธุรกิจขนาดเล็ก. อัตราค่าน้ำประปาพื้นที่ กปภ. สาขาอื่น (ทั่วประเทศ). การประปาส่วนภูมิภาค. สืบค้นจาก : http://www.pwa.co.th/ser vice/tariff_rate.html [29 ตุลาคม 2554]
- อัตราค่าไฟฟ้ากิจการขนาดเล็ก. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. สืบค้นจาก : <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html> [29 ตุลาคม 2554]
- Abolle, A., Kouakou, L. and Planche, H. 2009. The viscosity of diesel oil and mixtures and mixtures with straight vegetable oils: Palm, cabbage palm, cotton, groundnut, copra and sunflower. Biomass and Bioenergy. 33. pp. 1116-1121.
- Almeida, S.C.A., Belchior, C.R., Nascimento, M.V.G., Vieira, L.S.R. and Fleury, G. 2002. Performance of a diesel generator fuelled with palm oil. Fuel. 81. pp. 2097-2102.

- Alptekin, E. and Canakci, M. 2008. Determination of the density and the viscosities of biodiesel-diesel fuel blends. *Renewable Energy*. 33. pp. 2623-2630.
- Alptekin, E. and Canakci, M. 2009. Characterization of key fuel properties of methyl ester-diesel fuel blends. *Fuel*. 88. pp. 75-80.
- Andrade, E. N. 1930. The viscosity of liquids. *Nature*. 25. pp. 309-310.
- Balat, M. and Balat, H. 2007. A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel. *Energy Conversion and Management*. 49. pp. 2727-2741.
- Bari, S., Lim, T.H. and Yu, C.W. 2002. Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine. *Renewable Energy*. 27. pp. 339-351.
- Bekal, S. and Babu, T.P.A. 2008. Bio-fuel variants for use in CI engine at design and off-design regimes: An experimental analysis. *Fuel*. 87. pp. 3550-3561.
- Benjumea, P., Agudelo, J. and Agudelo, 2008. A. Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends. *Fuel*. 87. pp. 2069-2075.
- Chananand, K. 2011. Future of The Thai Palm Oil Industry. Impact. Bangkok. Thailand. [8 September 2011]
- Chen, H., Wang, J., Shuai, S. and Chen, W. 2008. Study of oxygenated biomass fuel blends on a diesel engine. *Fuel*. 87. pp. 3462-3468.
- Chen, W., Zhao, Z. and Yin, C. 2010. The interaction of waxes with pour point depressants. *Fuel*. 89. pp. 1127-1132.
- Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpattananondh, P. and Bunyakan, C. 2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Biomass & Bioenergy*. 31. pp. 563-568.
- Chotwichien, A., Luengaruemitchai, A. and Jai-In, S. 2009. Utilization of palm oil alkyl esters as an additive in ethanol-diesel. *Fuel*. 88. pp. 1618-1624.
- Demirbas, A. 2000. A direct route to the calculation of heating values of Liquid fuels by using their density and viscosity measurements. *Energy Conversion and Management*. 41. pp. 1609-1614.
- EI-Awad, M.M. and Yusaf, T.F. 2004. Performance and Exhaust Emission of a Diesel Engine Using Crude Palm Oil as Fuel Extender.

- Ejim, C. E., Fleck, B. A. and Amirfazli, A. 2007. Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects. *Fuel*. 86. pp. 1534-1544.
- Grunberg, L. and Nissan, A. H. 1949. Mixture law for viscosity. *Nature*. 25. pp. 309-310.
- James, A. T. and Martin, A. J. P. 1952. Gas liquid partition chromatography, the separation and microestimation of volatile fatty acids for formic acid to dodecanoic acid. *Biochemical Journal*. 50. pp. 679-690.
- Jansri, S. 2007. Kinetics of methyl ester production from crude palm oil by using acid-alkali catalyst. A Thesis for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering, Prince of Songkla University. Hat Yai. Thailand.
- Jansri, S., Prateepchaikul, G. and Ratanawilai, B. 2007. Acid-Catalyzed Esterification: A technique for Reducing High Free Fatty Acid in Mixed Crude Palm Oil. *Kasetsart Journal Natural Science*. 41. pp. 555-560.
- Haldar, S.K., Ghosh, B.B. and Nag, A. 2009. Studies on the comparison of performance and emission characteristics of a diesel engine using three degummed non-edible vegetable oils. *Biomass and Bioenergy*. 33. pp. 1013-1018.
- Heywood, J.B. 1988. *Internal Combustion Engines Fundamentals*. McGraw-Hill. Singapore.
- Kalam, M.A. and Masjuki, H.H. 2004. Emission and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil. *Biomass and Bioenergy*. 27. pp. 289-297.
- Kings, F.R. 1985. Meat fat formulation. *JAOCs*. 73. pp. 353-356.
- Ladommatos, N. and Goacher, J. 1995. Equations for predicting the cetane number of diesel fuels from their physical properties. *Fuel*. 74. pp. 1083-1093.
- Lee Jijit, T., Wisutmethangoon, W., Prateepchaikul, G., Tongurai, C. and Allen, M. 2004. A second order kinetics of palm oil transesterification. *The Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment*. Hua Hin. Thailand. 1. pp. 277-281.
- Lee Jijit, T. 2006. Design and Performance Test of A continuous Reactor for Palm Methyl Ester Production. A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Energy Technology. King Mongkut's University of Technology Thonburi. Bangkok. Thailand.

- Lee Jijit, T., Tongurai, C., Prateepchaikul, G. and Wisutmethangoon, W. 2008. Performance test of a 6-stage continuous reactor for palm methyl ester production. *Bioresource Technology*. 99. pp. 214-221.
- Lee Jijit, T. and Prateepchaikul, G. 2011. Comparative performance and emissions of IDI-turbo automobile diesel engine operated using degummed, deacidified mixed crude palm oil–diesel blends. *Fuel*. 90. pp. 1487-1491.
- Lepera, M.E. 1982. Fuel quality vs engine types. *Hydrocarbon Processing*. 61. pp. 139-142.
- Letoffe, J. M., Claudy, P., Kok, M. V., Garcin, M. and Vollet, J. L. 1995. Crude oils: characterization of waxes precipitated on cooling by d.s.c. and thermomicroscopy. *Fuel*. 74. pp. 810-816.
- Manning, R.E. Henderson, K.O. Zubler, M.T. Cannon Instrument Co. State College. PA 16803-1733. USA.
- Masjuki, H.H., Zaki, M. and Sii, H.S. 1996. Investigations on preheated palm oil methyl esters in diesel engine. *Journal of Power and Energy*. 210. pp. 131-138.
- Misra, R.D. and Murthy, M.S. 2010. Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14. pp. 3005-3013
- Murugesan, A., Umarani, C., Subramanian, R. and Nedunchezian, N. 2009. Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines-A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 13. pp. 653-662.
- Perry, R.H., Green, D. W. and Maloney, J. O. 1998. Perry's Chemical Engineers' Handbook Seventh Edition. Mc-Graw-Hill. Australia.
- Rakopoulos, C.D., Rakopoulos, D.C. Hountalas, D.T., Giakoumis, E.G. and Andritsakis, E.C. 2008. Performance and emissions of bus engine using blends of diesel fuel with bio-diesel of sunflower or cottonseeds oils derived from Greek feedstock. *Fuel*. 87. pp. 147-157.
- Prateepchaikul, G., Allen, M.L., Lee Jijit, T. and Thaeesinsopha, K. 2007. Methyl ester production from high free fatty acid mixed crude palm oil. *Songklanakarin J. Sci. Technol*. 29. pp. 1551-1561.
- Prateepchaikul, G. and Apichato, T. 2003. Palm oil as fuel for agriculture diesel engine: Comparative testing against diesel oil. *Songklanakarin J Sci Technol*. 25. pp. 317-326.

- Ramadhas, A. S., Jayaraj, S. and Muraleedharan, C. 2004. Use of vegetable oils as I.C. engine fuels-A review. *Renewable Energy*. 29. pp. 727-742.
- Ren, Y., Huang, Z., Miao, H., Di, Y., Jiang, D., Zeng, K., Liu, B. and Wang, X. 2008. Combustion and emissions of a diesel engine fuelled with diesel-oxygenate blends. *Fuel*. 87. pp. 2691-2697.
- Shahid, E.M. and Jamal, Y. 2007. A review of biodiesel as vehicular fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12. pp. 2484-2494.
- Sapaun, S.M., Masjuki, H.H. and Azlan, A. 1996. The use of palm oil as diesel fuel substitute. *Journal of Power and Energy*. 210. pp. 47-53.
- Shahid, E.M. and Jamal, Y. 2007. A review of biodiesel as vehicular fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12. pp. 2484-2494.
- Sri Asta, A. and Prasad, R. 2000. Triglycerides-based diesel fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 4. pp. 111-133.
- Sumathi, S., Chai, S.P. and Mohamed, A.R. 2008. Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12. pp. 2404-2421.
- Xue, J., Grift, T. E. and Hansena, A. C. 2011. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. pp. 1098-1116.
- Young, S. 2011. Inedible vegetable oils and their derivatives for alternative diesel fuels in CI engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. pp. 131-149.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ

การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันคำนวณได้จากสมการที่ ก.1

$$FFA (wt.%) = \frac{ml \times N \times 25.6}{g} \quad (ก.1)$$

กำหนดให้

- η คือ ความหนืดจลศาสตร์ (m^2/s)
- FFA คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมัน (wt.%)
- ml คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรท (ml)
- N คือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (molar)
- g คือ น้ำหนักน้ำมัน (g)

ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล

การคำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 4 ชนิด จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม
คำนวณด้วยค่าคงที่ ในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ค่าคงที่สำหรับใช้คำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล

ค่าคงที่	จำนวน
ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³)	918.08
ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³)	918.08
ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวและลดกรดที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³)	918.49
ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³)	901.57
ความหนาแน่นของเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³)	873.22
ความหนาแน่นของกรดพอสฟอริกความบริสุทธิ์ 85 wt.% ที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³) (Perry et al., 1998)	1688
ความหนาแน่นของกรดซัลฟิวริกความบริสุทธิ์ 98 wt.% ที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³) (Perry et al., 1998)	1826
ความหนาแน่นของเมทานอลความบริสุทธิ์ 98 wt.% ที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³) (Perry et al., 1998)	789
ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 30°C (kg/m ³) (Perry et al., 1998)	996
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์มดิบ ใช้แทนเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมทั้งหมด (kJ/kg.°C) (Leevijit, 2006)	2.0530
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของกรดพอสฟอริกความบริสุทธิ์ 85 wt.% ที่อุณหภูมิ 30°C (kJ/kg.°C) (Perry et al., 1998)	1.8657
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของกรดซัลฟิวริกความบริสุทธิ์ 98 wt.% ที่อุณหภูมิ 30°C (kJ/kg.°C) (Perry et al., 1998)	1.4195
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอลความบริสุทธิ์ 98 wt.% ที่อุณหภูมิ 30°C (kJ/kg.°C) (Perry et al., 1998)	2.7700
ค่าความจุความร้อนจำเพาะน้ำ (kJ/kg.°C)	4.1860

การคำนวณปริมาณไฟฟ้า คำนวณจากปริมาณความร้อนที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ตัวอย่าง
สมการคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

1. สมการคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ สมการที่ ข.1

$$Q_{EMCPO} = \sum mC_p \Delta T = (Q_1 + Q_2 + Q_3) + Q_4 \quad (\text{ข.1})$$

กำหนดให้

m คือ มวล (kg)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.°C)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ (°C)

- Q_1 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_2 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นเมทานอล 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_3 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นกรดซัลฟิวริก 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_4 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ไล่น้ำ 30 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-100 °C (kW-hr)

2. สมการคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้ผลิตเมทิลเอสเทอร์ สมการที่ ข.2

$$Q_{ME} = \sum mC_p\Delta T = Q_{3,EMCPO} + (Q_4 + Q_5) + Q_6 \quad (\text{ข.2})$$

กำหนดให้

- m คือ มวล (kg/hr)
- C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.°C)
- ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิ (°C)
- Q_1 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_2 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นเมทานอล 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_3 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นกรดซัลฟิวริก 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_4 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเทอร์ไฟน์ 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_5 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นเมทานอล 90 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-60°C (kW-hr)
- Q_7 คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้อุ่นเมทิลเอสเทอร์ไล่น้ำ 30 นาที ช่วงอุณหภูมิ 25-100°C (kW-hr)

ภาคผนวก ก
 ตั๋วทุนสารเคมี



ห้างหุ้นส่วนจำกัด ไฮไซน์ 62 ถ.จตุทิศ 3 อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
HIGH SCIENCE LIMITED PARTNERSHIP
TEL : 074-347242 , 074-346663 , FAX : 074-237410

ใบเสนอราคา (QUOTATION)

เรียน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
 ที่อยู่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มอ.

เลขที่ใบเสนอราคา
 วันที่

J-1201-3208
 18 January 2012

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม	ยี่ห้อ
1	Phosphoric Acid 35kgs./pail	1 pail	1,790.00	1,790.00	Commercial Grade
2	Sulfuric Acid 35kgs./pail	1 pail	535.00	535.00	Commercial Grade
3	Methanol 160kgs./drum	1 drum	4,850.00	4,850.00	Commercial Grade
4	Sodium Hydroxide 99% 25kgs./pack	1 pack	960.00	960.00	Commercial Grade
หมายเหตุ : ราคาที่เสนอรวมภาษีมูลค่าเพิ่ม และค่าขนส่งแล้ว					

กำหนดส่งสินค้า (Terms of Delivery) 7-10 วัน/Days

กำหนดยื่นราคา (Price Validity) 30 วัน/Days

กำหนดชำระเงิน (Payment Term) 7 วัน/Days

ห้างฯหวังเป็นอย่างยิ่ง ที่จะได้รับการพิจารณา
 สั่งซื้อจากท่าน พร้อมขอคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย
 ขอแสดงความนับถือ

อธิวัตร อรัญทรานิช

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการไขมัน



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
 Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003F/T ฉบับที่ 5 บังคับใช้ 29/05/52

เลขที่ 2350/53 หน้า 1/2

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : นายปริญญา หม่อมพิบูลย์
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 2293/53

วันที่รับตัวอย่าง : 20 กันยายน 2553

วันที่ขอใช้บริการฯ : 20 กันยายน 2553

ผู้ทดสอบ : นางสาวพิมพ์พิมพ์ เพ็ญจำรัส

วันที่ทำการทดสอบ : 29 กันยายน 2553

วิธีการทดสอบ : อ้างอิง WI-RES- GC-001

เครื่องมือทดสอบ : Agilent 6850 Gas Chromatograph – Flame Ionization Detector

เทคนิคการทดสอบ : Gas Chromatography

สภาวะการทดสอบ : **Gas Chromatograph**
 Inlet temp: 290°C, Split ratio: 50:1, Helium flow 1.0 mL/min Detector temp: 300°C
 Oven temp: 210°C held 25 minutes Hydrogen flow: 30 mL/min
 Ramp to 250°C held 5 minutes at 20°C/min Air flow flow: 300 ml/min
 Column: Varian CP9080, length 30 m., 0.32 mm I.D, film thickness 0.25 um Make up flow: 25 mL/min

รายละเอียดตัวอย่าง : น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม จำนวน : 1 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ที่	ชนิดของกรดไขมัน	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์	
		น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดกลิ่นลดกรด
1	C8:0	0.10713	0.10606
2	C10:0	0.17629	0.18920
3	C12:0	2.83085	3.13702
4	C14:0	1.92695	2.05099
5	C16:0	39.99391	39.61281
6	C16:1	0.16064	0.18359
7	C17:0	0.10008	0.09689
8	C18:0	4.46013	4.47902
9	C18:1	38.57195	38.50428
10	C18:2	9.64258	9.63355
11	C18:3	0.30734	0.28601
12	C20:0	0.38568	0.39752
13	C20:1	0.18696	0.18026
14	C22:0	-	-

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
 ยกเว้นทำหังฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์


 (นางรุสณี กุลวิจิตร)
 ผู้ตรวจสอบ


 (รศ. ดร. ชاکริศ พงษ์ไวย)
 ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาคผนวก จ
ผลการวิเคราะห์ค่าซีเทน



PTT PUBLIC COMPANY LIMITED

PTT Research & Technology Institute

71 Moo 2, Pahon Yo Thin Rd. km 78, Wang Noi, Ayuttaya 13170 THAILAND Tel. (662)537-3000
FAX (662)537-3000 Ext. 8316

Energy Application Technique and Engine Lab Department


TEST REPORT

Test Number : CFR-2011-35
Test Cell Number : TB109
Sample Description : น้ำมันปาล์มดิบ ที่บวมลดยางหนียวผสมโนเต้เซล 20% vol.
Customer : Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Prince of Songkla University
Customer Address : 105/1 Moo 3, Khohong, Hatyai, songkla 90110
Sample Received Date : August 30, 2011
Tested Date : September 05, 2011

Test Item	Methods	Result
Octane Number, Research Method (RON)	ASTM D 2699	-
Octane Number, Motor Method (MON)	ASTM D 2700	-
Cetane Number (CN)	ASTM D 613	56.8

REMARK Test Result of Check Fuel High = 55.4

Tested by 
(Tharapong Pengsagul)
Technician

Approved By 
(Somchai Siangsanorh)
Specialist

Energy Application Technique and Engine Lab Department

September 16, 2011

September 16, 2011

This test result is referred to only submitted sample.

(File Name: CFRTESTE.DOC) Revised as 5/02/2009

ภาคผนวก ฉ
ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟ

บันทึกงานที่ Pe12 /54

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตู้ปณ.2 คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 โทร 074-287055 โทรสาร 074-558833

ผู้ขอรับบริการ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วันที่รับตัวอย่าง : 1 กันยายน พ.ศ.2554

ชื่อตัวอย่าง	รายการวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์
1. ดีกัม MCPO 20:80 ดีเซล	จุดวาบไฟ(Flash point, ASTM D93)	77°C
2.เอสเทอร์ไฟน์ MCPO 30:70 ดีเซล	จุดวาบไฟ(Flash point, ASTM D93)	78°C



(นายชนกร เกียรติชัยบุญตร)

ผู้วิเคราะห์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเทพธิร รัตนวิไล)

รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายวิชาการ
ปฏิบัติราชการแทนหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์กากถ่าน



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
 Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003/T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 2709/54 หน้า 1 / 1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : นายปริญญา หม่อมพิบูลย์
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เลขที่ใบขอใช้บริการฯ : 2589/54

วันที่รับตัวอย่าง : 26 สิงหาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการฯ : 26 สิงหาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นายศักดิ์ชัยดี สังข์แก้ว

วันที่ทำการทดสอบ : 30 -31 สิงหาคม 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างอิง REF-RES-ASTM D 4530-03

เครื่องมือทดสอบ : High Temperature Furnace

เทคนิคการทดสอบ : Gravimetric method

สภาวะการทดสอบ : เตาที่อุณหภูมิ 500 ± 2 °C เป็นเวลา 15 นาที

รายละเอียดตัวอย่าง : น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม จำนวน : 2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ที่	ชื่อตัวอย่าง	Carbon residue (% wt.)	(%RSD)	เกณฑ์มาตรฐาน (% wt.)
1	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดขางเหนียวผสมไนติเซล 20 vol.%	0.20	8.68	0.30
2	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมแอสเตอร์ ไฟท์ผสมไนติเซล 30 vol.%	0.14	7.85	

%RSD = % Relative standard deviation
 Limit of Method = 0.1 – 30 %wt


 (นางรุสณี กุลสวัสดิ์)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

๙ กันยายน 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
 ยกเว้นทำหังฉบับ โคอไล้ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์เถ้าซัลเฟต



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University
Central Academic Administrator Bld. Hat-Yai Campus, Songkhla 90110 Tel.0 7428 6904-7 Fax.0 7421 2813

F-RES-003T ฉบับที่ 6 บังคับใช้ 20/10/53

เลขที่ 2710/54 หน้า 1/1

รายงานผลการทดสอบ

ชื่อและที่อยู่ลูกค้า : นายปริญญา หม่อมพิบูลย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เลขที่ใบขอใช้บริการ : 2590/54

วันที่รับตัวอย่าง : 26 สิงหาคม 2554

วันที่ขอใช้บริการ : 26 สิงหาคม 2554

ผู้ทดสอบ : นายศักดิ์ชัยคี ดั่งซ์แก้ว

วันที่ทำการทดสอบ : 3 - 7 กันยายน 2554

วิธีการทดสอบ : อ้างอิง REF-ASTM D 874-07

เครื่องมือทดสอบ : High Temperature Furnace

เทคนิคการทดสอบ : Gravimetric method

สภาวะการทดสอบ : เตาที่อุณหภูมิ 775 ± 25 °C

รายละเอียดตัวอย่าง : น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม จำนวน : 2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ :

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	Sulfate Ash, mass % (%RSD)
1	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมคอกางเหนียวผสมในดีเซล 20 vol.%	0.0074 (5.14)
2	น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเอสเตอร์ไฟ์ผสมในดีเซล 30 vol.%	0.0056 (3.44)

เกณฑ์มาตรฐาน 0.02%

%RSD = % Relative standard deviation

Limit of the method 0.005 mass %

(นางรุสนี กุณวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

9 กันยายน 2554

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน
ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาคผนวก ญ
ผลการวิเคราะห์การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

บันทึกงานที่ Pe3 /55

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตู้ปณ.2 คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 โทร 074-287055 โทรสาร 074-558833

ผู้ขอรับบริการ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

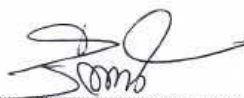
วันที่รับตัวอย่าง : 23 ธันวาคม พ.ศ.2554

ชื่อตัวอย่าง	รายการวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์
1. ดีเซล	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (ASTM-D130)	No. 1a
2. EMCPO	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (ASTM-D130)	No. 1a
3. Dg MCPO	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (ASTM-D130)	No. 1a



(นายชนกร เกียรติชัยบุตร)

ผู้วิเคราะห์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล)

รองหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมีฝ่ายวิชาการ
ปฏิบัติราชการแทนหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ภาคผนวก ฅ
ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

ตารางที่ ฅ.1 ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงภาระโหลด ที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm

ดีเซล	ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load	1.28	2.55	3.83	5.10
1.1	2204	2199	2203	2199	2205	3.9	7.8	11.7	15.5	18.0
1.2	2206	2199	2205	2203	2197	3.9	7.8	11.7	15.5	18.0
1.3	2204	2198	2198	2198	2206	3.9	7.8	11.7	15.5	17.9
1.4	2205	2201	2203	2202	2201	3.9	7.8	11.7	15.5	17.9
1.5	2204	2199	2206	2200	2209	3.9	7.8	11.7	15.5	17.9
2.1	2205	2204	2202	2197	2195	3.9	7.8	11.7	15.5	18.0
2.2	2203	2204	2204	2193	2195	3.9	7.8	11.7	15.5	18.0
2.3	2206	2201	2201	2192	2203	3.9	7.8	11.7	15.4	18.0
2.4	2206	2201	2196	2199	2204	3.9	7.8	11.7	15.4	18.0
2.5	2199	2200	2198	2196	2204	3.9	7.8	11.7	15.4	18.0
3.1	2206	2200	2197	2192	2197	3.9	7.8	11.7	15.4	18.0
3.2	2200	2206	2196	2195	2210	3.9	7.8	11.7	15.4	18.0
3.3	2201	2206	2198	2192	2190	3.9	7.8	11.7	15.4	18.0
3.4	2198	2206	2200	2190	2195	3.9	7.8	11.7	15.4	18.0
3.5	2206	2203	2200	2192	2190	3.9	7.8	11.7	15.5	18.0
ค่าเฉลี่ย	2204	2202	2200	2196	2200	3.9	7.8	11.7	15.5	18.0
SD	2.75	2.81	3.27	4.09	6.42	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04

ลดยางหนึ่ยว 20	ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load	1.28	2.55	3.83	5.10
1.1	2202	2204	2205	2199	2210	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
1.2	2204	2202	2200	2201	2210	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
1.3	2205	2204	2195	2199	2200	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
1.4	2202	2204	2201	2199	2194	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
1.5	2201	2201	2202	2201	2190	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
2.1	2203	2196	2203	2200	2190	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
2.2	2201	2197	2203	2200	2197	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
2.3	2204	2197	2196	2203	2202	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
2.4	2205	2196	2200	2198	2194	3.9	7.8	11.7	15.5	18.4
2.5	2202	2196	2201	2202	2190	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
3.1	2202	2196	2198	2202	2195	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5

ลดยางเหนียว 20	ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
3.2	2201	2196	2197	2203	2206	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
3.3	2202	2195	2199	2203	2210	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
3.4	2202	2196	2199	2196	2200	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
3.5	2204	2202	2195	2199	2195	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
ค่าเฉลี่ย	2203	2199	2200	2200	2199	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
SD	1.40	3.53	3.02	2.06	7.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07

เอสเตอร์ไฟน์ 30	ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
1.1	2199	2194	2199	2199	2185	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
1.2	2197	2193	2202	2200	2213	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
1.3	2200	2195	2201	2202	2217	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
1.4	2195	2194	2201	2201	2185	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
1.5	2197	2194	2201	2202	2190	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
2.1	2196	2195	2200	2201	2210	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
2.2	2195	2193	2196	2199	2213	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
2.3	2200	2195	2200	2201	2207	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
2.4	2197	2196	2202	2203	2214	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
2.5	2196	2197	2200	2201	2214	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
3.1	2197	2196	2204	2206	2189	3.9	7.8	11.7	15.5	18.5
3.2	2196	2196	2199	2209	2184	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
3.3	2201	2195	2197	2204	2186	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
3.4	2199	2195	2199	2205	2203	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
3.5	2195	2195	2197	2202	2210	3.9	7.8	11.7	15.5	18.6
ค่าเฉลี่ย	2197	2195	2200	2202	2201	3.90	7.80	11.70	15.50	18.6
SD	1.99	1.13	2.13	2.72	13.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05

ดีเซล	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
ระยะเวลาสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 50 ml (s)	1	99.97	94.53	92.13	86.54	92.13
	2	99.69	94.97	91.40	87.28	91.40
	3	99.87	94.81	91.56	87.25	91.56
	ค่าเฉลี่ย	99.84	94.77	91.70	87.02	91.70
	SD	0.14	0.22	0.38	0.42	0.38
อุณหภูมิ (°C)	1	41.2	36.7	37.2	34.2	37.2
	2	39.0	36.8	37.4	33.9	37.4
	3	37.5	36.9	36.6	34.3	36.6
	ค่าเฉลี่ย	39.23	36.80	37.07	34.13	37.07
	SD	1.86	0.10	0.42	0.21	0.42

ดีเซล	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1	99.97	94.53	92.13	86.54	820.40
	2	99.69	94.97	91.40	87.28	820.28
	3	99.87	94.81	91.56	87.25	820.75
	ค่าเฉลี่ย	99.84	94.77	91.70	87.02	820.47
	SD	0.14	0.22	0.38	0.42	0.24
ลดยางเหนียว 20	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
ระยะเวลาสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 50 ml (s)	1	95.10	93.15	90.03	86.82	90.03
	2	96.37	92.63	89.68	85.86	89.68
	3	95.72	92.78	90.72	86.97	90.72
	ค่าเฉลี่ย	95.73	92.85	90.14	86.55	90.14
	SD	0.64	0.27	0.53	0.60	0.53
อุณหภูมิ (°C)	1	30.9	32.4	33.3	30.9	33.3
	2	31.0	32.0	32.2	31.2	32.2
	3	31.0	31.6	31.9	31.1	31.9
	ค่าเฉลี่ย	30.97	32.00	32.47	31.07	32.47
	SD	0.06	0.40	0.74	0.15	0.74
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1	841.20	840.20	839.60	841.20	839.60
	2	841.14	840.47	840.34	841.00	840.34
	3	841.14	840.74	840.54	841.07	840.54
	ค่าเฉลี่ย	841.16	840.47	840.16	841.09	840.16
	SD	0.04	0.27	0.49	0.10	0.49
เอสเตอรีไฟน์ 30	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
ระยะเวลาสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 50 ml (s)	1	94.15	92.25	88.46	85.00	88.46
	2	94.69	91.81	89.47	85.72	89.47
	3	94.62	92.06	90.12	85.54	90.12
	ค่าเฉลี่ย	94.49	92.04	89.35	85.42	89.35
	SD	0.29	0.22	0.84	0.37	0.84
อุณหภูมิ (°C)	1	34.5	33.9	30.9	34.3	30.9
	2	33.4	33.3	30.9	33.5	30.9
	3	32.9	33.0	30.9	32.9	30.9
	ค่าเฉลี่ย	33.60	33.40	30.90	33.57	30.90
	SD	0.82	0.46	0.00	0.70	0.00

เอสเตอรีไฟน์ 30	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1	843.74	844.11	845.96	843.86	845.96
	2	844.42	844.48	845.96	844.35	845.96
	3	844.72	844.66	845.96	844.72	845.96
	ค่าเฉลี่ย	844.29	844.42	845.96	844.31	845.96
	SD	0.51	0.28	0.00	0.43	0.00

	ภาระโหลด (kW)	ดีเซล	ลดยางเหนียว 20	เอสเตอรีไฟน์ 30
ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)		42921	41318	41421
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยปริมาตร (m ³ /hr)	1.28	0.000716	0.000729	0.000726
	2.55	0.001002	0.001000	0.001014
	3.83	0.001336	0.001320	0.001341
	5.10	0.001620	0.001661	0.001695
	Full Load	0.001963	0.001997	0.002015
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/hr)	1.28	0.59	0.61	0.61
	2.55	0.82	0.84	0.85
	3.83	1.10	1.11	1.13
	5.10	1.33	1.40	1.43
	Full Load	1.61	1.68	1.70
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เบรกจำเพาะ (kg/kW-hr)	1.28	0.46	0.48	0.48
	2.55	0.32	0.33	0.33
	3.83	0.29	0.29	0.29
	5.10	0.26	0.27	0.28
	Full Load	0.27	0.28	0.28
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)	1.28	18.30	18.21	18.16
	2.55	26.15	26.54	26.01
	3.83	29.42	30.17	29.56
	5.10	31.89	31.75	30.93
	Full Load	31.44	30.74	31.10

ชนิดน้ำมัน	ภาระโหลด (kW)	1.28	2.55	3.83	5.10	Full Load
ดีเซล	CO (ppm)	427	257	520	1022	1991
	NOx (ppm)	105	187	293	365	405
	FT (°C)	174	229	275	325	414
ลดยางเหนียว 20	CO (ppm)	357	189	339	611	835
	NOx (ppm)	123	211	299	403	413
	FT (°C)	147	198	249	293	387
เอสเตอรีไฟน์ 30	CO (ppm)	307	186	275	740	1459
	NOx (ppm)	121	225	354	431	426
	FT (°C)	138	210	268	313	407

ตารางที่ ๓.๒ ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ที่การเดินเครื่องยนต์เต็มกำลังในช่วงความเร็วรอบ 1,600-2,400 rpm

ดีเซล	ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400	1600	1800	2000	2200	2400
1.1	1593	1806	2005	2205	2404	19.1	19.7	18.7	18.0	16.7
1.2	1592	1806	2006	2197	2402	19.1	19.7	18.7	18.0	16.7
1.3	1601	1799	2001	2206	2396	19.1	19.7	18.7	17.9	16.7
1.4	1605	1790	1993	2201	2403	19.1	19.7	18.7	17.9	16.7
1.5	1601	1791	2001	2209	2393	19.0	19.7	18.7	17.9	16.7
2.1	1592	1792	1993	2195	2401	19.0	19.7	18.7	18.0	16.7
2.2	1593	1793	1992	2195	2405	19.1	19.7	18.7	18.0	16.7
2.3	1591	1799	2006	2203	2406	19.0	19.7	18.7	18.0	16.7
2.4	1591	1799	1996	2204	2404	19.0	19.7	18.7	18.0	16.7
2.5	1592	1798	1998	2204	2397	19.0	19.7	18.7	18.0	16.7
3.1	1593	1792	2002	2197	2399	19.0	19.7	18.7	18.0	16.7
3.2	1592	1793	2002	2210	2398	19.1	19.7	18.8	18.0	16.7
3.3	1601	1803	1996	2190	2406	19.1	19.7	18.8	18.0	16.7
3.4	1605	1802	1993	2195	2401	19.1	19.7	18.8	18.0	16.7
3.5	1601	1800	1994	2190	2401	19.1	19.7	18.7	18.0	16.7
ค่าเฉลี่ย	1596	1798	1999	2200	2401	19.1	19.7	18.7	18.0	16.7
SD	5.36	5.40	5.05	6.42	3.84	0.05	0.00	0.04	0.04	0.00

ลดยางหนี้ยว 20	ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400	1600	1800	2000	2200	2400
1.1	1595	1797	2000	2210	2403	20.2	20.4	19.3	18.4	17.0
1.2	1607	1798	2001	2210	2395	20.2	20.4	19.3	18.4	17.0
1.3	1608	1795	1998	2200	2395	20.2	20.4	19.3	18.4	17.0
1.4	1593	1806	1997	2194	2400	20.1	20.5	19.3	18.4	17.0
1.5	1594	1805	1996	2190	2397	20.1	20.4	19.3	18.4	17.0
2.1	1601	1805	1994	2190	2401	20.1	20.5	19.4	18.4	17.1
2.2	1593	1808	1992	2197	2393	20.1	20.5	19.4	18.4	17.0
2.3	1592	1789	1990	2202	2396	20.1	20.5	19.3	18.4	17.0
2.4	1591	1815	1997	2194	2403	20.1	20.4	19.4	18.4	17.0
2.5	1591	1805	2000	2190	2396	20.1	20.4	19.4	18.5	17.0
3.1	1592	1817	2004	2195	2401	20.1	20.4	19.4	18.5	17.0
3.2	1592	1807	2009	2206	2395	20.3	20.4	19.4	18.5	17.1
3.3	1593	1818	2000	2210	2395	20.3	20.4	19.4	18.6	17.1
3.4	1601	1805	2000	2200	2400	20.3	20.4	19.4	18.6	17.1
3.5	1601	1805	1998	2195	2401	20.3	20.4	19.4	18.5	17.1

ลดยางเหนียว 20		ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400	1600	1800	2000	2200	2400	
ค่าเฉลี่ย	1596	1805	1998	2199	2398	20.2	20.4	19.4	18.5	17	
SD	5.79	8.00	4.64	7.33	3.33	0.09	0.05	0.05	0.07	0.05	

เอสเตอรีโฟน 30		ความเร็วรอบ (rpm)					แรงบิด (lb/ft)				
ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400	1600	1800	2000	2200	2400	
1.1	1589	1797	1992	2185	2405	20.4	20.7	19.4	18.6	17.2	
1.2	1587	1790	1986	2213	2407	20.4	20.7	19.4	18.6	17.2	
1.3	1587	1818	1984	2217	2417	20.4	20.7	19.4	18.6	17.2	
1.4	1587	1817	1985	2185	2412	20.4	20.7	19.4	18.6	17.0	
1.5	1589	1796	1981	2190	2417	20.4	20.7	19.4	18.6	17.0	
2.1	1584	1816	1996	2210	2391	20.4	20.6	19.3	18.6	17.2	
2.2	1591	1806	1990	2213	2406	20.4	20.6	19.3	18.5	17.2	
2.3	1598	1809	1992	2207	2408	20.4	20.7	19.4	18.5	17.2	
2.4	1589	1785	1997	2214	2393	20.4	20.7	19.4	18.5	17.2	
2.5	1591	1808	1998	2214	2406	20.4	20.7	19.4	18.5	17.2	
3.1	1587	1819	1993	2189	2408	20.4	20.6	19.4	18.5	17.2	
3.2	1590	1794	1987	2184	2396	20.4	20.6	19.3	18.6	17.2	
3.3	1596	1786	1990	2186	2394	20.4	20.6	19.4	18.6	17.2	
3.4	1601	1807	1990	2203	2407	20.4	20.7	19.4	18.6	17.2	
3.5	1596	1811	1993	2210	2391	20.4	20.7	19.4	18.6	17.2	
ค่าเฉลี่ย	1591	1804	1990	2201	2404	20.4	20.7	19.4	18.6	17.2	
SD	4.81	11.74	4.93	13.02	8.80	0.00	0.05	0.04	0.05	0.07	

ดีเซล	ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400
ระยะเวลาสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 50 ml (s)	1	114.62	99.97	94.53	92.13	86.54
	2	115.00	99.69	94.97	91.40	87.28
	3	113.16	99.87	94.81	91.56	87.25
	ค่าเฉลี่ย	114.26	99.84	94.77	91.70	87.02
	SD	0.97	0.14	0.22	0.38	0.42
อุณหภูมิ (°C)	1	40.8	41.2	36.7	37.2	34.2
	2	40.6	39.0	36.8	37.4	33.9
	3	40.7	37.5	36.9	36.6	34.3
	ค่าเฉลี่ย	40.70	39.23	36.80	37.07	34.13
	SD	0.10	1.86	0.10	0.42	0.21

ดีเซล	ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1	818.29	818.06	820.69	820.40	822.15
	2	818.41	819.34	820.63	820.28	822.33
	3	818.35	820.22	820.57	820.75	822.09
	ค่าเฉลี่ย	818.35	819.21	820.63	820.47	822.19
	SD	0.06	1.09	0.06	0.24	0.12
ลดขงเหนียว 20	ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400
ระยะเวลาสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 50 ml (s)	1	107.31	95.10	93.15	90.03	86.82
	2	107.29	96.37	92.63	89.68	85.86
	3	107.02	95.72	92.78	90.72	86.97
	ค่าเฉลี่ย	107.21	95.73	92.85	90.14	86.55
	SD	0.16	0.64	0.27	0.53	0.60
อุณหภูมิ (°C)	1	35.9	30.9	32.4	33.3	30.9
	2	34.3	31.0	32.0	32.2	31.2
	3	34.3	31.0	31.6	31.9	31.1
	ค่าเฉลี่ย	34.83	30.97	32.00	32.47	31.07
	SD	0.92	0.06	0.40	0.74	0.15
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1	837.87	841.20	840.20	839.60	841.20
	2	838.94	841.14	840.47	840.34	841.00
	3	838.94	841.14	840.74	840.54	841.07
	ค่าเฉลี่ย	838.58	841.16	840.47	840.16	841.09
	SD	0.62	0.04	0.27	0.49	0.10
เอสเตอรีไฟน์ 30	ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400
ระยะเวลาสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 50 ml (s)	1	106.81	94.15	92.25	88.46	85.00
	2	106.00	94.69	91.81	89.47	85.72
	3	106.44	94.62	92.06	90.12	85.54
	ค่าเฉลี่ย	106.42	94.49	92.04	89.35	85.42
	SD	0.41	0.29	0.22	0.84	0.37
อุณหภูมิ (°C)	1	35.2	34.5	33.9	30.9	34.3
	2	34.7	33.4	33.3	30.9	33.5
	3	33.9	32.9	33.0	30.9	32.9
	ค่าเฉลี่ย	34.60	33.60	33.40	30.90	33.57
	SD	0.66	0.82	0.46	0.00	0.70
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1	843.30	843.74	844.11	845.96	843.86
	2	843.61	844.42	844.48	845.96	844.35
	3	844.11	844.72	844.66	845.96	844.72
	ค่าเฉลี่ย	843.67	844.29	844.42	845.96	844.31
	SD	0.41	0.51	0.28	0.00	0.43

	ความเร็วรอบ (rpm)	ดีเซล	ลดยางเหนียว 20	เอสเตอรีไฟน์ 30		
ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)		42921	41318	41421		
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยปริมาตร (m ³ /hr)	1600	0.001575	0.001679	0.001691		
	1800	0.001803	0.001880	0.001905		
	2000	0.001899	0.001939	0.001956		
	2200	0.001963	0.001997	0.002015		
	2400	0.002068	0.002080	0.002107		
	ความเร็วรอบ (rpm)	ดีเซล	ลดยางเหนียว 20	เอสเตอรีไฟน์ 30		
ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)		42921	41318	41421		
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/hr)	1600	1.29	1.41	1.43		
	1800	1.48	1.58	1.61		
	2000	1.56	1.63	1.65		
	2200	1.61	1.68	1.70		
	2400	1.70	1.75	1.78		
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เบรกจำเพาะ (kg/kW-hr)	1600	0.28	0.29	0.29		
	1800	0.28	0.29	0.29		
	2000	0.28	0.28	0.29		
	2200	0.27	0.28	0.28		
	2400	0.28	0.29	0.29		
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)	1600	29.73	29.53	29.49		
	1800	30.30	30.01	30.05		
	2000	30.87	30.04	30.29		
	2200	31.44	30.74	31.10		
	2400	30.36	29.51	30.09		
ชนิดน้ำมัน	ความเร็วรอบ (rpm)	1600	1800	2000	2200	2400
ดีเซล	CO (ppm)	3696	3945	2416	1991	1635
	NOx (ppm)	310	328	362	405	436
	FT (°C)	394	396	423	414	409
ลดยางเหนียว 20	CO (ppm)	3009	3539	2197	835	1263
	NOx (ppm)	345	360	397	413	443
	FT (°C)	358	364	389	387	361
เอสเตอรีไฟน์ 30	CO (ppm)	3736	2934	1362	1459	1763
	NOx (ppm)	359	390	408	426	466
	FT (°C)	334	364	378	407	355

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายปริญญา หม่อมพิบูลย์
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120133

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ปริญญา หม่อมพิบูลย์ ธีระยุทธ หลีวิจิตร กำพล ประทีปชัยกุล และ จีระศักดิ์ เพ็ชรเจริญ. 2553. ความหนืดของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8. สงขลา. ประเทศไทย. 21-22 เมษายน 2553.

ปริญญา หม่อมพิบูลย์ ธีระยุทธ หลีวิจิตร กำพล ประทีปชัยกุล จีระศักดิ์ เพ็ชรเจริญ และ กฤตพจน์ เทพธร. 2553. กระบวนการและต้นทุน ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ จากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. อุบลราชธานี. ประเทศไทย. 20-22 ตุลาคม 2553.

ปริญญา หม่อมพิบูลย์ ธีระยุทธ หลีวิจิตร กำพล ประทีปชัยกุล และ นรัฐ สีนอุดม. 2554. การเกิดไขของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9. ภูเก็ต. ประเทศไทย. 2-3 พฤษภาคม 2554.