



## การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศและผลของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลต่อสมรรถนะและก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์

วราคม วงศ์ชัย\*

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-5423-7352 อีเมล: dolic45@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.010

รับเมื่อ 13 มิถุนายน 2559 ตอรับเมื่อ 25 ตุลาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 14 พฤศจิกายน 2560

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพร้อมทั้งทำการศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซลในการศึกษาสมรรถนะและการปล่อยก๊าซไอเสียใช้เครื่องยนต์ดีเซลลูกสูบเดี่ยว อัตราส่วนเชื้อเพลิงผสมไบโอดีเซลที่ทำการศึกษาคือ BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ขายในท้องตลาด (B7) ที่ภาวะโหลดสูงสุด โดยเพิ่มความเร็วยกครั้งละ 200 รอบต่อนาที ตั้งแต่ความเร็วรอบ 1,200–2,000 รอบต่อนาที ผลการศึกษาค้นคว้าของไบโอดีเซลพบว่ามีค่ากรดไขมันเททิลเอสเทอร์ 97.38% โดยน้ำหนัก ค่าความหนืด 7.46 cSt ที่ 40°C ค่าความเป็นกรด 0.41 mg KOH/g และค่าความร้อนสูง 42.53 MJ/kg ผลการศึกษาค้นคว้าเครื่องยนต์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมส่งผลทำให้แรงบิด กำลัง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง (B100 มีค่าลดลงเฉลี่ย 7.57%, 7.49% และ 13.72% ตามลำดับ) แต่อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น (B100 มีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 16.92%) เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ส่วนการปล่อยก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมจะมีการปล่อย CO ลดลงแต่มีการปล่อย CO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> เพิ่มขึ้น ในส่วนของ SO<sub>2</sub> ไม่มีการปล่อยออกมาในทุกอัตราส่วนของเชื้อเพลิงผสม

**คำสำคัญ:** ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศ, สมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล, การปล่อยก๊าซไอเสีย

## Biodiesel Production from Tung Oil and Its Effects on Diesel Engine Performance and Emission Characteristics

Warakhom Wongchai\*

Department of Energy Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0-5423-7352, E-mail: dolic45@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.010

Received 13 June 2016; Accepted 25 October 2016; Published online: 14 November 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This paper presents the biodiesel production from Tung oil, prepared by transesterification using potassium hydroxide (KOH) as catalyst. Biodiesel properties was also investigated. Engine performance and emission tests were conducted on a single-cylinder diesel engine fueled with Tung oil biodiesel blends (BD10, BD20, BD30, BD50 and B100) compared with conventional diesel (B7) fuel at a full-load engine speed range of 1,200–2,000 rpm with intervals of 200 rpm. The Tung oil biodiesel contained the fatty acid methyl ester (FAME) of 97.38% wt., viscosity of 7.46 cSt at 40°C, acid value of 0.41 mg KOH/g and a heating value of 42.53 MJ/kg. The experimental results showed that the increase of Tung oil biodiesel blend ratio decreased in torque, power and thermal efficiency (B100 showed average decrease 7.57%, 7.49% and 13.72%, respectively) but increased a specific fuel consumption (B100 showed an average increase 16.92%) compared to diesel. Exhaust gas emission results indicated that diesel blend of increasing Tung oil biodiesel gave a reduction in carbon monoxide (CO) but an increase in carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and oxides of nitrogen (NO<sub>x</sub>). Sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) has not been detected all of fuel blends.

**Keywords:** Tung Oil Biodiesel, Diesel Engine Performance, Exhaust Gas Emission

## 1. บทนำ

ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ทำให้มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้น ส่งผลทำให้มีปริมาณสำรองลดลงและเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาพลังงานทดแทน ประเทศไทยมีการใช้พลังงานในปี พ.ศ. 2558 ปริมาณ 77,881 พันตัน เทียบเท่ากับน้ำมันดิบ (Ktoe) เพิ่มขึ้นจากปีพ.ศ. 2557 ร้อยละ 2.7 คิดเป็นมูลค่ากว่า 998,428 ล้านบาท [1], [2] โดยน้ำมันสำเร็จรูปเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 49.0 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด รองลงมาเป็นไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ตามลำดับ [3]

ต้นมะเขือเทศหรือ Tung Tree เป็นไม้ยืนต้นเมื่อโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 20 เมตร มี 2 สายพันธุ์คือ Vernicia Montana และ Vernicia Fordii กระจายตัวอยู่ในพื้นที่ป่าเปิดที่มีความสูงต่ำกว่า 1,600 เมตร ในประเทศจีน พม่า ไต้หวัน ไทย เวียดนาม และมีบางส่วนถูกนำไปปลูกที่ประเทศญี่ปุ่นและมาลาวี [4], [5] ผลมะเขือเทศให้น้ำมันในปริมาณสูงประมาณ 21% โดยน้ำหนักของผล หรือ 41% โดยน้ำหนักของเนื้อเมล็ด [5] จากรายงานการศึกษาของ W. Warakhom พบว่าในปี พ.ศ. 2553 จังหวัดลำปางมีการปลูกต้นมะเขือเทศเพื่อใช้เป็นพืชพลังงานทดแทนตามโครงการ “อปท. ลำปาง รวมใจภักดิ์ รักพื้นที่สีเขียว” ปลูกพืชพลังงานทดแทน “ต้นมะเขือเทศ” โดยองค์การบริหารส่วนจังหวัดลำปาง มากกว่า 500,000 ต้น กระจายตามพื้นที่ต่างๆ ในจังหวัดลำปาง ปัจจุบันพบว่าต้นมะเขือเทศมีอายุ 5 ปี เริ่มให้ผลผลิตจำนวนมาก แต่ยังไม่มีการศึกษาเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ [6] น้ำมันมะเขือเทศ (Tung Oil) มีประโยชน์มากมายทั้งใช้สำหรับเป็นสีทา (Paints) เคลือบเงา (Varnishes) กระบวนการทางพอลิเมอร์ (Polymerization) หรือแม้กระทั่งนำมาใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิงโดยการผลิตไบโอดีเซล [7]

ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester; FAME) โดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันจากพืชกับ

แอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol; MeOH) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อลดความหนืด (Viscosity) และเพิ่มการระเหย (Volatility) ของน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มของอัลคาไลน์นิยมใช้กันมากเพื่อให้เกิดกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [7] โดยเฉพาะ KOH กับ NaOH เนื่องจากมีจำหน่ายโดยทั่วไปและมีราคาถูก [8] มีรายงานการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศของ Yi-Hung Chen และคณะ พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ MeOH ต่อน้ำมันมะเขือเทศเท่ากับ 6:1 และตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ KOH 1.0% โดยน้ำหนักของน้ำมันมะเขือเทศอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60°C ความเร็วในการกวน 400–600 rpm ทำให้เกิด FAME ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 97.7–97.8 [5] และ Do-Van Manh และคณะ ได้ศึกษาเพิ่มเติมพบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ที่ทำให้เกิด FAME ได้ดีคืออยู่ในช่วง 1.25–1.5% ถ้าหากเพิ่มปริมาณมากกว่านี้มีผลทำให้ FAME เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย [9]

ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศถือเป็นทางเลือกด้านพลังงานทดแทนที่น่าสนใจเนื่องจากต้นมะเขือเทศสามารถปลูกในประเทศไทย เป็นไม้ยืนต้นอายุมากกว่า 30 ปี ให้ผลผลิตทางด้านน้ำมันสูง เพื่อให้สามารถประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลและการประเมินผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นจากการนำไปใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศ รวมไปถึงศึกษาสมรรถนะและการปล่อยก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์จากการใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาคั้งนี้คือเพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซล น้ำมันมะเขือเทศที่ปลูกในประเทศไทย และศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศและน้ำมันดีเซลต่อแรงบิด (Torque) กำลัง (Power) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) และการปล่อยก๊าซไอเสีย (Emission) ในเครื่องยนต์ดีเซล

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การทดลองนี้ศึกษาการสกัดน้ำมันจากมะเขยาคิน และใช้น้ำมันมะเขยาคินมาผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เพื่อศึกษาสมบัติของไบโอดีเซล และผลของน้ำมันผสมดีเซล-ไบโอดีเซลต่อสมรรถนะและการปล่อยก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์

### 2.1 การสกัดน้ำมันมะเขยาคิน

การศึกษาค้างนี้ใช้มะเขยาคิน (*Vernicia Montana*) ที่ปลูกในจังหวัดลำปางตามโครงการ“อปท.ลำปาง รวมใจภักดิ์ รักพื้นที่สีเขียว” ปลูกพืชพลังงานทดแทน“ต้นมะเขยาคิน” โดยองค์การบริหารส่วนจังหวัดลำปาง มีอายุต้น 5 ปี มีผลและเมล็ดดังรูปที่ 1

นำผลมะเขยาคินตากแดดประมาณ 5–7 วันหรือจนกว่าจะจนแห้ง แล้วแกะเปลือกและกะลาออกจนเหลือแต่เนื้อเมล็ด นำเนื้อเมล็ดมะเขยาคินตากแดดอีกประมาณ 2–3 วัน จากนั้นทำการสกัดทางกลโดยใช้เครื่องอัดแบบสกรูขนาดกำลังมอเตอร์ 200 W ให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องไปจนถึง 100°C เพื่อหาร้อยละผลได้ (Yield) ของน้ำมัน

### 2.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขยาคิน

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขยาคินครั้งนี้ใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ MeOH ต่อน้ำมันมะเขยาคินเท่ากับ 6:1 และใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1.25%wt ของน้ำมันมะเขยาคิน มีรายละเอียดดังนี้

1) ให้ความร้อนแก่น้ำมันมะเขยาคินโดยใช้เตาความร้อน (Hot Plate Stirrer) จนถึงอุณหภูมิ 60°C

2) ผสม KOH ลงไปใน MeOH แล้วคนให้เข้ากันจนละลาย จากนั้นเทสารผสม KOH กับ MeOH ลงไปในน้ำมันมะเขยาคินที่อุณหภูมิ 60°C แล้วคนด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นระยะเวลา 60 นาที

3) ทิ้งไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการแยกชั้น แล้วทำการแยกกลีเซอรินสีนออก



(ก)

(ข)

รูปที่ 1 ลักษณะผล (ก) และเมล็ดมะเขยาคิน (ข)

4) ล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำสะอาดจำนวน 2 รอบแล้วแยกน้ำออก

5) ทำการต้มไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 60°C เพื่อไล่น้ำจนมีสีเหลืองใสแล้วทิ้งไว้ให้เย็น

### 2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขยาคิน

กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (FAME) ตรวจวิเคราะห์ตามวิธีการมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้เครื่อง GC-MS ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash Point) จุดไหลเท (Pour Point) จุดขุ่นตัว (Cloud Point) การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip) ค่าความเป็นกรด (Acid Value) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ปริมาณกำมะถัน (Sulphur Content) ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value) และเถ้า (Ash) ตรวจวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM รายละเอียดดังตารางที่ 1 และ 2

### 2.4 การศึกษาสมรรถนะและการปล่อยก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล

การศึกษาค้างนี้ใช้ชุดทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลแบบลูกสูบเดี่ยว ขนาดกำลังสูงสุด 7.5 แรงม้า โดยไม่ได้ทำการปรับแต่งเครื่องยนต์ มีรายละเอียดดังตารางที่ 3 ต่อเข้า

**ตารางที่ 1** รายการอุปกรณ์และเครื่องมือวัดสมบัติของไบโอดีเซล

| Property                | Equipment                   | Manufacturer                 | Test method |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------|
| Viscosity @ 40°C (cSt)  | K21420                      | Koehler, USA                 | ASTM D445   |
| Flash Point (°C)        | K16270                      | Koehler, USA                 | ASTM D93    |
| Pour Point (°C)         | Cloud and Pour Point Tester | Pyrex, USA                   | ASTM D97    |
| Cloud Point             | Cloud and Pour Point Tester | Pyrex, USA                   | ASTM D2500  |
| Copper Strip            | Copper Strip Tester         | Applied Scientific, Thailand | ASTM D130   |
| Acid Value (mg KOH/g)   | Titration                   | Pyrex, USA                   | ASTM D664   |
| Specific Gravity 15.6°C | Hydrometer                  | Brannan, UK                  | ASTM D1298  |
| Sulfur Content (%wt.)   | Oxygen Bomb Calorimeter     | Parr Instrument, USA         | ASTM D2622  |
| Heating Value (MJ/kg)   | Oxygen Bomb Calorimeter     | Parr Instrument, USA         | ASTM D240   |
| Ash (% wt.)             | Vulcan 3-550                | Dentsply, USA                | ASTM D482   |

**ตารางที่ 2** สภาวะการทำงานการทำงานของเครื่อง GC-MS

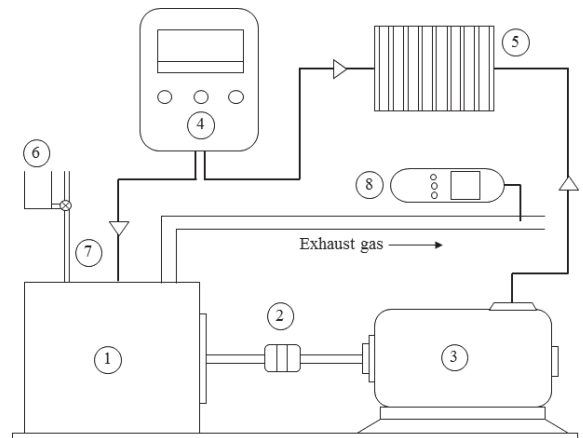
| Property             | Specifications  |
|----------------------|---|
| Carrier Gas          | Helium (1.5 ml/min)   |
| Detector Temperature | 300°C   |
| Sample Volume        | 1 µl  |
| Column Dimension     | HP-INNOWAX<br>(30 m × 0.25 mm × 0.25 µm)                                |
| Injector Type        | Split 30:1  |
| Injector Condition   | 250°C   |
| Temperature          | 100°C (5 min)   |
| Temperature Ramp     | 2°C/min 190°C (3 min)<br>2°C/min 220°C (3 min)<br>5°C/min 250°C (2 min) |

**ตารางที่ 3** ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ใช้ศึกษา

| Engine parameter        | Specifications                                  |
|-------------------------|---|
| Make of Model           | YANMAR TF75LM                                   |
| Engine Type             | Four-stroke, IDI, single cylinder, water-cooled |
| Bore                    | 80 mm   |
| Stroke                  | 87 mm   |
| Compression Ratio       | 21.0:1  |
| Rated Power             | 7.5 HP  |
| Nozzle Opening Pressure | 117.7 bar                                       |

กับเครื่องปั่นไฟเพื่อสร้างภาระโหลด และเครื่องปั่นไฟจะจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อน ดังรูปที่ 2 การศึกษาครั้งนี้ใช้ภาระโหลดสูงสุด (Full Load) ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทำการวัดค่าโดยใช้บิวเรต ต่อเข้ากับถังน้ำมันเชื้อเพลิงและบันทึกเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา ตรวจวัดปริมาณก๊าซไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ (Combustion Gas Analyzer) ยี่ห้อ KIMO รุ่น KIGAZ 300

การทดลองนี้ใช้น้ำมันดีเซลที่ขายในท้องตลาดของปตท. (B7) โดยผสมดีเซล-ไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 50:50 และ 0:100 โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากันโดยการกวน การทดลองครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาส่วนผสมของไบโอดีเซลในช่วง 0-50% เนื่องจากการทดลองใช้เครื่องยนต์ที่ออกแบบสำหรับน้ำมันดีเซล สัญลักษณ์และอัตราส่วนของน้ำมันผสม แสดง



- |                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| 1. Diesel Engine   | 5. Heater       |
| 2. Universal Shaft | 6. Fuel Tank    |
| 3. Generator       | 7. Burette      |
| 4. Controller Box  | 8. Gas Analyzer |

**รูปที่ 2** ชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล

ดังตารางที่ 4 ความเร็วเครื่องยนต์ที่ทำการศึกษาคือ 1,200 rpm, 1,400 rpm, 1,600 rpm, 1,800 rpm และ 2,000 rpm ในการทดลองทั้งหมดนี้เริ่มต้นสตาร์ทเครื่องยนต์ด้วยน้ำมันดีเซลเป็นเวลาประมาณ 5 นาที เพื่ออุ่นเครื่องยนต์ จากนั้นจึงเริ่มทดสอบน้ำมันผสม โดยเริ่มต้นจากน้ำมันผสม D100 ที่ความเร็ว 1,200 rpm และเพิ่มขึ้นทีละ 200 rpm ไปจนถึง 2,000 rpm ในระหว่างการทดสอบทำการบันทึกปริมาณน้ำมันที่ใช้ โดยใช้บิวเรตและนาฬิกาจับเวลา พร้อมทั้งตรวจวัดก๊าซไอเสียที่ปล่อยออกมาตรงบริเวณส่วนปลายของท่อไอเสียพร้อมบันทึกค่า จากนั้นเปลี่ยนเป็นน้ำมันผสม BD10 ไปจนถึง B100 แล้ววนกลับมาเริ่มต้นใหม่ทดลอง 3 ซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำมาคำนวณหาค่าแรงบิด โดยใช้สมการที่ (1)

$$T = F \times R \quad (1)$$

เมื่อ F คือ แรงที่กระทำโดย Generator (N)

R คือ ระยะจากจุดศูนย์กลาง Generator ถึงจุดวัดแรงกระทำ (m)

หาค่ากำลังของเครื่องยนต์ โดยใช้สมการที่ (2)

$$P = \frac{2\pi nT}{(60)(1000)} \quad (2)$$

เมื่อ P คือ กำลังเพลอาเบรคของเครื่องยนต์ (kW)

n คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

T คือ แรงบิด (N.m)

หาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยใช้สมการที่ (3)

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (3)$$

เมื่อ SFC คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kW-h)

$\dot{m}_f$  คือ ปริมาณการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h) และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยใช้

สมการที่ (4)

$$\eta_{th} = \frac{3600}{SFC \times HHV} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

ตารางที่ 4 สัญลักษณ์และอัตราส่วนของน้ำมันผสม

| สัญลักษณ์ | อัตราส่วนผสม (% vol.) |                    |
|-----------|-----------------------|--------------------|
|           | Diesel                | Tung oil Biodiesel |
| D100      | 100                   | 0                  |
| BD10      | 90                    | 10                 |
| BD20      | 80                    | 20                 |
| BD30      | 70                    | 30                 |
| BD50      | 50                    | 50                 |
| B100      | 0                     | 100                |

## 2.5 การวิเคราะห์ความผิดพลาดของการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ทำการวิเคราะห์ความผิดพลาด (Error) และความไม่แน่นอน (Uncertainties) ของเครื่องมือ (Instrument) สภาวะ (Condition) การทวนสอบ (Calibration) สิ่งแวดล้อม (Environmental) และการอ่านค่า (Reading) ประกอบด้วยตัวแปร Power, Torque, Specific Fuel Consumption, Thermal Efficiency, CO, CO<sub>2</sub>, และ NO<sub>x</sub> มีรายละเอียดดังตารางที่ 5 ค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดของการทดลองแสดงดังสมการที่ (5)

ความไม่แน่นอนของการทดลองนี้คือ

$$= \text{Square root of } \{(\text{uncertainty of } P)^2 + (\text{uncertainty of } T)^2 + (\text{uncertainty of } SFC)^2 + (\text{uncertainty of } TE)^2 + (\text{uncertainty of } CO)^2 + (\text{uncertainty of } CO_2)^2 + (\text{uncertainty of } NO_x)^2\} \quad (5)$$

ความไม่แน่นอนของการทดลองนี้ = Square root of  $\{(0.2)^2 + (0.2)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (2.4)^2 + (2.4)^2 + (5.5)^2\} = \pm 6.6\%$



**ตารางที่ 5** รายการเครื่องมือ ช่วงการทำงาน (Range) ความแม่นยำ (Accuracy) และความไม่แน่นอน (Uncertainty)

| Instruments                  | Range                      | Accuracy              | %Uncertainty |
|------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|
| Gas Analyzer                 | CO 0–1,025 ppm             | ±5% of measured value | ±2.4         |
|                              | CO <sub>2</sub> 0–99% vol. | -                     | ±2.4         |
|                              | NO <sub>x</sub> 0–446 ppm  | -                     | ±5.5         |
| Speed Measuring Unit         | 0–900 rpm                  | ±10 rpm               | ±0.1         |
| Load Indicator               | 0–100 kg                   | ±0.1 kg               | ±0.2         |
| Burette for Fuel Measurement | 10 cc                      | ±0.1 cc               | ±1           |
| Digital stop watch           | -                          | ±0.6 s                | ±0.2         |

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

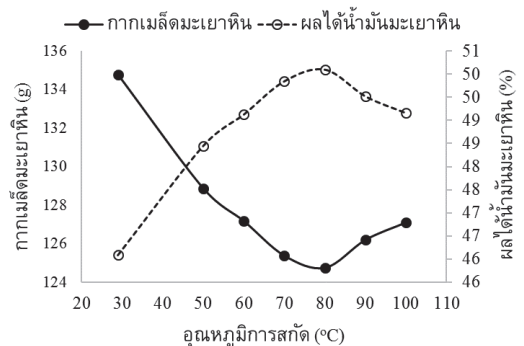
การศึกษาการสกัดน้ำมันมะเขยาคิน การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขยาคิน สมบัติของไบโอดีเซล การศึกษาสมรรถนะและการปล่อยก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ จากการใช้เชื้อเพลิงผสมดีเซล-ไบโอดีเซล ได้ผลการศึกษาดังนี้

#### 3.1 การสกัดน้ำมันมะเขยาคิน

จากการศึกษาพบว่าผลมะเขยาคินแห้งประกอบด้วยส่วนเปลือก 56.0% กะลา 18.1% และเมล็ด 25.9% โดยน้ำหนัก การสกัดน้ำมันมะเขยาคินใช้วิธีการสกัด ทางกลโดยใช้เครื่องอัดแบบสกรู ขนาดกำลังมอเตอร์ 200 W ให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน เริ่มต้นที่เมล็ดมะเขยาคินหนัก 250 g เท่ากัน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการสกัดสูงขึ้น จะเกิดน้ำมันมะเขยาคินในปริมาณที่สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิการสกัดที่ 80°C จะได้ปริมาณน้ำมันมะเขยาคินสูงสุดคิดเป็น 50.1% โดยน้ำหนัก ผู้วิจัยพบว่าที่อุณหภูมิการสกัดต่ำเกินไป น้ำมันจะไหลออกมาค่อนข้างยากเนื่องจากมีความหนืดสูงทำให้น้ำมันบางส่วนติดไปกับกากเมล็ด แต่ในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูงเกินไป น้ำมันมีความหนืดต่ำเกินไปจนไหลติดกับกากเมล็ดมะเขยาคินทำให้น้ำมันที่ได้มีปริมาณลดลงดังรูปที่ 3

#### 3.2 ไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขยาคินและคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์

การศึกษาครั้งนี้พบว่าการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้อัตราส่วนโดย


**รูปที่ 3** ผลของอุณหภูมิสกัดต่อปริมาณน้ำมันที่ได้

โมลของ MeOH ต่อน้ำมันมะเขยาคินเท่ากับ 6:1 และใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1.25% โดยน้ำหนักของน้ำมันมะเขยาคิน มีปริมาณการเกิด (Yield) ไบโอดีเซล 98.5% และเกิด FAME ในปริมาณ 97.38% โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับงานวิจัย [5], [9] และ [10] ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจะต้องมี FAME มากกว่า 96.5% ขึ้นไป ความหนาแน่นมีค่า 887.2 kg/m<sup>3</sup> จุดวาบไฟมีค่า 189°C จุดไหลเทมีค่า -14°C การกัดกร่อนทองแดงมีค่า 1b ค่าความเป็นกรดมีค่า 0.41 mg KOH/g ความถ่วงจำเพาะมีค่า 0.892 และปริมาณกำมะถันมีค่า 0.0003%wt. อยู่ในช่วงข้อกำหนดของกำหนดของไบโอดีเซล ในส่วนของความหนืดมีค่า 7.46 cSt ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดต้องอยู่ในช่วง 3.50–5.00 cSt ค่าความร้อนพบว่ามีค่าน้อยกว่าดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 42.53 MJ/kg ส่วนดีเซลมีค่าเท่ากับ 45.36 MJ/Kg ดังตารางที่ 6

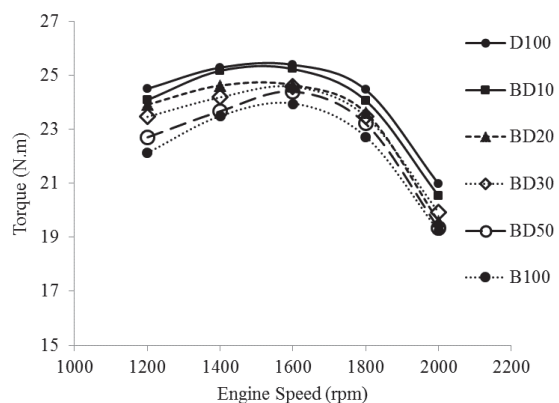
ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขือเทศ

| Method     | Property                | Diesel [11] | Tung oil | Tung oil Biodiesel | Biodiesel Standard |
|------------|-------------------------|-------------|----------|--------------------|--------------------|
| EN 14103   | FAME (% wt.)            | –           | –        | 97.38              | ≥96.50             |
| ASTM D445  | Viscosity @ 40°C (cSt)  | 3.10        | 87.6     | 7.46               | 3.50–5.00          |
| ASTM D93   | Flash Point (oC)        | 72          | 248      | 189                | ≥120               |
| ASTM D97   | Pour Point (oC)         | –           | –27      | –14                | ≤10                |
| ASTM D2500 | Cloud Point             | –           | –        | 4                  | –                  |
| ASTM D130  | Copper Strip            | –           | –        | 1b                 | ≤Number 1          |
| ASTM D664  | Acid Value (mg KOH/g)   | –           | –        | 0.41               | ≤0.50              |
| ASTM D1298 | Specific Gravity 15.6°C | 0.845       | –        | 0.892              | ≤0.920             |
| ASTM D2622 | Sulfur Content (%wt. )  | –           | –        | 0.0003             | ≤0.0010            |
| ASTM D240  | Heating Value (MJ/kg)   | 45.36       | –        | 42.53              | –                  |
| ASTM D482  | Ash (% wt. )            | –           | 0.0300   | 0.0096             | Max 0.02           |

### 3.3 สมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล

#### 3.3.1 แรงบิดและกำลัง

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดที่ความเร็วต่าง ๆ พบว่าแรงบิดเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบเครื่องยนต์จนถึงค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm หลังจากนั้นเริ่มลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น เพราะที่ความเร็วรอบต่ำเกิดสูญญากาศที่ต่ำกว่าในกระบอกสูบ (Lower Vacuum of Cylinder) เกิดการกลายเป็นไอที่ต่ำกว่า (Lower Vaporization) และจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) ส่งผลทำให้แรงบิดลดต่ำลง [11]–[13] และที่ความเร็วรอบสูงเกิดประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่ต่ำกว่า (Lower Volumetric Efficiency) และการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียทางกล (Mechanical Losses) จึงส่งผลทำให้แรงบิดลดต่ำลง [11], [12], [14] แรงบิดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า [15]–[17] และมีความหนืดที่สูงกว่าทำให้การแตกตัวเป็นละอองฝอยได้ต่ำกว่าจึงทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำลง [18], [19] แรงบิดมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm โดยน้ำมันดีเซล D100 มีค่าเท่ากับ 25.39 N.m และน้ำมันผสม BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 มีค่าเท่ากับ 25.23, 24.63, 24.58, 24.40 และ 23.94 N.m ตามลำดับหรือลดลง 0.63, 2.99, 3.19, 3.90 และ 5.71%

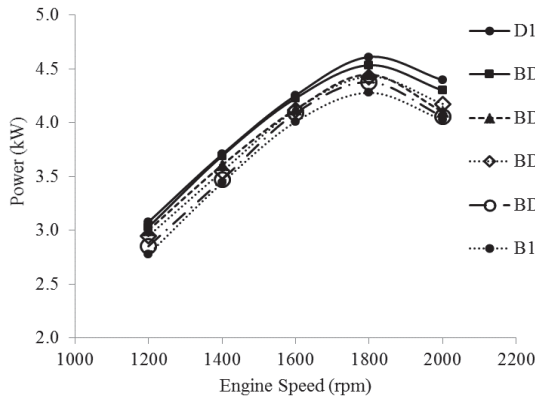


รูปที่ 4 แรงบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้ไขมันผสมอัตราส่วนต่างๆ

ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ D100

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่ากำลังเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบเครื่องยนต์จนถึงค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,800 rpm หลังจากนั้นเริ่มลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วรอบสูงจะทำให้เกิดแรงเสียดทาน (Frictional Force) ที่สูงกว่า [11], [15], [20] กำลังมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า [12], [13], [16], [17] และมีความหนืดที่สูงกว่าทำให้มีความต้านทานการไหลของเชื้อเพลิงที่



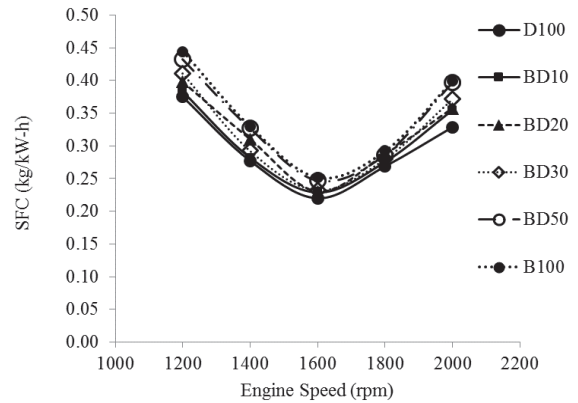


รูปที่ 5 กำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันผสมอัตราส่วนต่างๆ

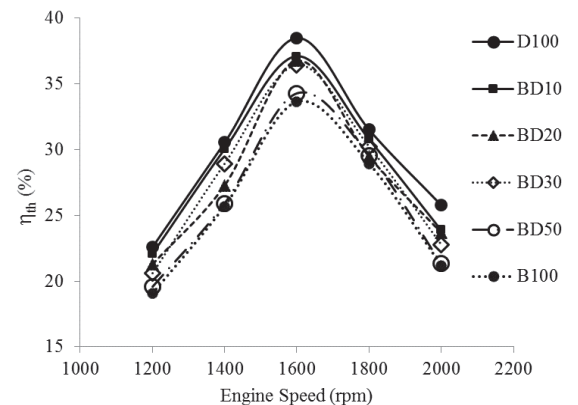
สูงกว่า ส่งผลทำให้เกิดการฉีดที่ล่าช้ากว่า [12], [21] กำลังมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,800 rpm โดยน้ำมันดีเซล D100 มีค่าเท่ากับ 4.61 kW และน้ำมันผสม BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 มีค่าเท่ากับ 4.54, 4.45, 4.43, 4.38 และ 4.28 kW ตามลำดับ หรือลดลง 1.52, 3.47, 3.90, 4.99 และ 7.16% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ D100

### 3.3.2 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะขึ้นกับความสัมพัทธ์ของปริมาตรการฉีดเชื้อเพลิง ความหนาแน่น ความหนืด และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [22], [23] จากรูปที่ 6 พบว่าที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับการศึกษา [12], [15], [17], [24] สาเหตุเนื่องจากไบโอดีเซลมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า มีความหนืดที่สูงกว่า และไบโอดีเซลยังมีออกซิเจนในโครงสร้างสูงกว่าดีเซลเมื่อเผาไหม้จึงทำให้สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,200 rpm โดยน้ำมันดีเซล D100 มีค่าเท่ากับ 0.375 kg/kW-h และน้ำมันผสม BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 มีค่าเท่ากับ 0.383, 0.398, 0.411, 0.433 และ 0.444 kg/kW-h ตามลำดับหรือเพิ่มขึ้น 2.13, 6.13, 9.60, 15.47 และ 18.40% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ D100



รูปที่ 6 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันผสมอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันผสมอัตราส่วนต่างๆ

### 3.3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบเครื่องยนต์จนถึงค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm หลังจากนั้นเริ่มลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น ซึ่งแปรผกผันกับอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ [16], [24] ที่ความเร็วรอบต่ำเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ [12] ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าต่ำ ส่วนที่

ความเร็วรอบสูงมีการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานและการสูญเสียทางกลส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน (Heat Loss) จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง [24] ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า [16], [25] และยังมีการแตกตัวเป็นอะตอมฟอย (Atomization) และการกลายเป็นไอน้ำต่ำกว่า เนื่องจากมีความหนืดและความหนาแน่นสูงกว่าดีเซล [25] ส่งผลทำให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,600 rpm โดยน้ำมันดีเซล D100 มีค่าเท่ากับ 38.51% และน้ำมันผสม BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 มีค่าเท่ากับ 37.08, 36.75, 36.44, 34.26 และ 33.62% ตามลำดับหรือลดลง 3.71, 4.57, 5.38, 11.04 และ 12.70% ตามลำดับเมื่อเทียบกับ D100

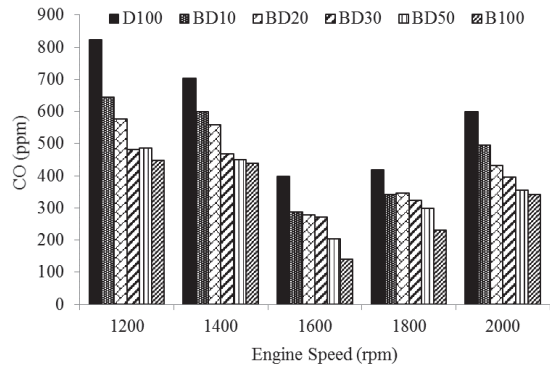
### 3.4 ไอเสียจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล

#### 3.4.1 ก๊าซไอเสีย CO

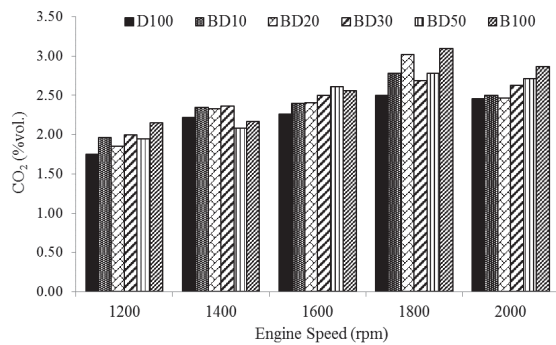
CO เกิดจากผลของการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และยังขึ้นปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น ความเร็วรอบ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air Fuel Ratio) แรงดันการฉีด (Injection Pressure) และระยะเวลาการฉีด (Injection Timing) เชื้อเพลิงรูปที่ 8 พบว่าเมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นปริมาณการปล่อย CO จะลดลง เนื่องจากเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนและค่าซีเทน (Cetane Number) ที่สูงกว่าดีเซล จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า [12], [15], [17], [18] โดยเฉลี่ยน้ำมันดีเซล D100 มีการปล่อย CO เท่ากับ 588 ppm และน้ำมันผสม BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 มีค่าเท่ากับ 474, 438, 387, 359 และ 319 ppm ตามลำดับหรือลดลง 19.42, 25.48, 34.12, 38.98 และ 45.68% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ D100

#### 3.4.2 ก๊าซไอเสีย CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub> เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง หากมีปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่สูงกว่าบ่งบอกถึงมี

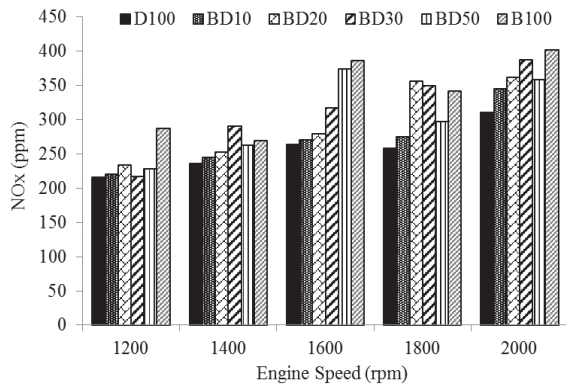


รูปที่ 8 ปริมาณ CO ที่ปล่อยออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์



รูปที่ 9 ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่ปล่อยออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า [26] จากรูปที่ 9 พบว่าเมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นปริมาณการปล่อย CO<sub>2</sub> จะเพิ่มขึ้น [12], [13] เนื่องจากไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าจึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า [12], [15], [17], [18] และยังมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่สูงกว่าจึงเกิด CO<sub>2</sub> ได้สูงกว่าดีเซล [27] โดยเฉลี่ยน้ำมันดีเซล D100 มีการปล่อย CO<sub>2</sub> เท่ากับ 2.24% และน้ำมันผสม BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 มีค่าเท่ากับ 2.40, 2.42, 2.44, 2.43 และ 2.57%vol. ตามลำดับหรือเพิ่มขึ้น 7.15, 7.95, 8.85, 8.40 และ 14.83% ตามลำดับเมื่อเทียบกับ D100



รูปที่ 10 ปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่ปล่อยออกมาจากไอเสียของเครื่องยนต์

### 3.4.3 ก๊าซไอเสีย NO<sub>x</sub>

รูปที่ 10 แสดงปริมาณการปล่อย NO<sub>x</sub> ของเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าการปล่อย NO<sub>x</sub> เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ และเมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นปริมาณการปล่อย NO<sub>x</sub> จะเพิ่มขึ้นทุกความเร็วรอบ [12], [28] ไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าดีเซลเฉลี่ยประมาณ 12% [18], [29] ส่งผลทำให้เกิด NO<sub>x</sub> ในระหว่างการเผาไหม้สูงกว่าดีเซล [12], [25] การศึกษาครั้งนี้พบว่าโดยเฉลี่ยน้ำมันดีเซล D100 มีการปล่อย NO<sub>x</sub> เท่ากับ 257 ppm และน้ำมันผสม BD10, BD20, BD30, BD50 และ B100 มีค่าเท่ากับ 271, 297, 312, 304 และ 337 ppm ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้น 5.53, 15.50, 21.50, 18.38 และ 31.13% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ D100

สำหรับก๊าซไอเสีย SO<sub>2</sub> พบว่าไม่มีการปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ในการทดสอบครั้งนี้ เนื่องจากปริมาณกำมะถัน (Sulphur Content) ในไบโอดีเซลมะเขายาหีนมีน้อยมาก เมื่อเกิดการสันดาปจึงตรวจไม่พบ SO<sub>2</sub> ในไอเสียของเครื่องยนต์

## 4. สรุป

ผลมะเขายาหีนแห้งประกอบด้วยส่วนเปลือก 56.0% กะลา 18.1% และเมล็ด 25.9% โดยน้ำหนัก การสกัด

น้ำมันมะเขายาหีนโดยวิธีการสกัดทางกลที่อุณหภูมิการสกัด 80°C จะได้ปริมาณน้ำมันมะเขายาหีนสูงสุดคิดเป็น 50.1% โดยน้ำหนักของเนื้อเมล็ด

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขายาหีนโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของ MeOH ต่อน้ำมันมะเขายาหีนเท่ากับ 6:1 และใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 1.25% โดยน้ำหนักของน้ำมันมะเขายาหีน พบว่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลอยู่ในช่วงข้อกำหนดของกำหนดของไบโอดีเซล ยกเว้นความหนืดมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย

แรงบิด กำลัง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ลดลงในทุกช่วงความเร็วรอบ เมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนผสม B100 พบว่าแรงบิด กำลัง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลงโดยเฉลี่ย 7.57, 7.49 และ 13.72% ตามลำดับ แต่ในส่วนของการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 16.92% เมื่อเทียบกับ D100

การปล่อยก๊าซไอเสียพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลในเชื้อเพลิงผสมมากขึ้น จะมีการปล่อย CO ลดลง แต่มีการปล่อย CO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> เพิ่มขึ้นในทุกช่วงความเร็วรอบ ที่อัตราส่วนผสม B100 พบว่ามีการปล่อย CO ลดลงเฉลี่ย 45.68% แต่มีการปล่อย CO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 14.83% และ 31.13% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ D100 ในส่วนของ SO<sub>2</sub> พบว่าไม่มีการปล่อยออกมาในทุกอัตราส่วนของเชื้อเพลิงผสม

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันมะเขายาหีนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกทดแทนดีเซลได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการปรับแก้เครื่องยนต์ แต่อาจส่งผลทำให้สมรรถนะเครื่องยนต์ลดลงเล็กน้อย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางและองค์การบริหารส่วนจังหวัดลำปาง ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Mori, “Development of utilization technologies of biomass energy,” *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 67–72, March 2009.
- [2] J. Werther, “Sustainable and energy-efficient utilization of biomass by co-combustion in large-scale power stations,” *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 135–144, May 2009.
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2016, March 19). *Energy situation of Thailand 2015* [Online]. Available: [http://www.dede.go.th/download/state\\_59/frontpagedec2558.pdf](http://www.dede.go.th/download/state_59/frontpagedec2558.pdf). (in Thai).
- [4] B. Li and M.G. Gilbert, “*Vernicia loureiro*,” *Fl. Cochinch. 2:586.1790. Fl. China 11*, vol. 11, pp. 266–267, April 2008.
- [5] Y. H. Chen, J. H. Chen, C. Y. Chang, and C. C. Chang, “Biodiesel production from tung (*Vernicia montana*) oil and its blending properties in different fatty acid compositions,” *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 24, pp. 9521–9526, December 2010.
- [6] W. Warakhom, “Growing factors of tung tree and biodiesel production from tung oil,” Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, March 2015 (in Thai).
- [7] L. C. Meher, D. Sagar, and S. N. Naik, “Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review,” *Renew. Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 248–268, June 2006.
- [8] E. Lotero, Y. Liu, D.E. Lopez, K. Suwannakarn, D. A. Bruce, and J. G. Goodwin, “Synthesis of biodiesel via acid catalysis,” *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 44, no. 14, pp. 5353–5363, January 2005.
- [9] D. V. Manh, Y. H. Chen, C. C. Chang, C. Y. Chang, C. V. Minh, and H. D. Hanh, “Parameter evaluation of biodiesel production from unblended and blended Tung oils via ultrasound-assisted process,” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 43, no. 3, pp. 368–373, May 2012.
- [10] Y. H. Chen, J. H. Chen, and Y. M. Luo, “Complementary biodiesel combination from tung and medium-chain fatty acid oils,” *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 305–310, August 2012.
- [11] W. Warakhom, “Effects of pyrolysis oil-diesel blends on the performances and emissions of a small diesel engine,” *The Journal of Industrial Technology*, vol. 10, no. 2, pp 72–84, May-August 2014 (in Thai).
- [12] S. M. Palash, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. E. Atabani, I. M. Fattah, and A. Sanjid, “Biodiesel production, characterization, diesel engine performance, and emission characteristics of methyl esters from *Aphanamixis polystachya* oil of Bangladesh,” *Energy Conversion and Management*, vol. 91, pp. 149–157, February 2015.
- [13] H. Aydin and H. Bayindir, “Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 588–592, March 2010.
- [14] A. M. Liaquat, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, I. M. Rizwanul Fattah, M. A. Hazrat, M. Varman, M. Mofijur, and M. Shahabuddin, “Effect of coconut biodiesel blended fuels on engine performance and emission characteristics,” in *Proceedings IOOC-ECOC 5th BSME International Conference on Thermal Engineering*, vol. 56, pp. 583–590, May 2013.



- [15] M. M. Rashed, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, M. Mofijur, M. G. Rasul, and N. W. M. Zulkifli, "Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm, jatropha, and moringa oil methyl ester," *Industrial Crops and Products*, vol. 79, pp. 70–76, January 2016.
- [16] A. Atmanli, E. Ileri, and N. Yilmaz, "Optimization of diesel–butanol–vegetable oil blend ratios based on engine operating parameters," *Energy*, vol. 96, pp. 569–580, February 2016.
- [17] O. Özener, L. Yükses, A. T. Ergenç, and M. Özkan, "Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics," *Fuel*, vol. 115, pp. 875–883, January 2014.
- [18] J. Xuea, E. Grift, and C. Hansena, "Effect of bio-diesel on engine performances and emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1098–1116, February 2011.
- [19] Z. Utlu and M. S. Kocak, "The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions," *Renew Energy*, vol. 33, no. 8, pp. 1936–1941, August 2008.
- [20] S. Punyota and N. Krasaelom, "Performance study of a small size diesel engine operated with used palm oil and diesel blends," *Princess of Naradhiwas University Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 41–52, May–August 2011 (in Thai).
- [21] C. Hasimoglu, M. Ciniviz, I. Özsert, Y. İçingür, A. Parlak, and M. Salman, "Performance characteristics of a low heat rejection diesel engine operating with biodiesel," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1709–1715, July 2008.
- [22] D. H. Qi, H. Chen, L. M. Geng, and Y. Z. Bian, "Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends," *Energy Convers Manage*, vol. 51, no. 12, pp. 2985–2992, December 2010.
- [23] I. Shancita, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, I. M. Rizwanul Fattah, M. M. Rashed, and H. K. Rizwanul Fattah, "A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles," *Energy Convers Manage*, vol. 88, pp. 794–807, December 2014.
- [24] M. J. Abedin, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, M. F. M. Sabri, S. M. A. Rahman, A. Sanjid, and I. M. R. Fattah, "Production of biodiesel from a non-edible source and study of its combustion, and emission characteristics: A comparative study with B5," *Renewable Energy*, vol. 88, pp. 20–29, April 2016.
- [25] I. M. Monirul, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, M. H. Mosarof, N. W. M. Zulkifli, Y. H. Teoh, and H. G. Howa, "Assessment of performance, emission and combustion characteristics of palm, jatropha and Calophyllum inophyllum biodiesel blends," *Fuel*, vol. 181, pp. 985–995, October 2016.
- [26] M. Gumus, "A comprehensive experimental investigation of combustion and heat release characteristics of a biodiesel (hazelnut kernel oil methyl ester) fueled direct injection compression ignition engine," *Fuel*, vol. 89, no. 10, pp. 2802–2814, October 2010.
- [27] H. Sanli, M. Canakci, E. Alptekin, A. Turkean, and A. N. Ozsezen, "Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission

- characteristics of a DI diesel engine,” *Fuel*, vol. 159, pp. 179–187, November 2015.
- [28] A. Keskin, M. Gürü, D. Altıparmak, and K. Aydin, “Using of cotton oil soapstock biodiesel–diesel fuel blends as an alternative diesel fuel,” *Renewable Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 553–557, April 2008.
- [29] P. K. Devan and N. V. Mahalakshmi, “A study of the performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine using methyl ester of paradise oil–eucalyptus oil blends,” *Applied Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 675–680, May 2009.