



การศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง  
A Potential Study of Crude Palm Oil as Fuel for Direct Combustion

นิลเนตร จันทรแก้ว  
Nilnet Jankaew

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

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง  
A Potential Study of Crude Palm Oil as Fuel for Direct Combustion

นิลเนตร จันท์แก้ว  
Nilnet Jankaew

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

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      การศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง  
 ผู้เขียน              นางสาวนิลเนตร จันทร์แก้ว  
 สาขาวิชา              วิศวกรรมเครื่องกล

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

.....ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็น  
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กวินพัฒน์ สิริกานติโสภณ)  
 รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวนิลเนตร จันทร์แก้ว)

นักศึกษา



(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้  
ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวนิลเนตร จันทร์แก้ว)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง
ผู้เขียน	นางสาวนิลเนตร จันทร์แก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2563

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยสนับสนุนการใช้พลังงานทางเลือกมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานชีวมวล ซึ่งข้อดีของการใช้พลังงานชีวมวลนอกจากจะเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยแล้วยังเป็นอีกวิธีในการช่วยเหลือเกษตรกรเมื่อเกิดสภาวะผลผลิตล้นตลาดอีกด้วย เช่น ในช่วงปี 2561-2562 ภาคใต้ของประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกปาล์มส่วนใหญ่ในประเทศประสบปัญหาผลผลิตล้นตลาด โดยปกติแล้วน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่จะผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์หรือเติมสารอื่นๆก่อนแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น น้ำมันไบโอดีเซล, น้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค, เครื่องสำอางค์ เป็นต้น แต่เมื่อเกิดสภาวะผลผลิตล้นตลาด ส่งผลให้อุปสงค์ไม่สอดคล้องกับอุปทาน ทำให้เกษตรกรผู้ปลูกปาล์มต้องเผชิญปัญหาผลผลิตราคาต่ำ ดังนั้น การเร่งระบายผลผลิตออกจากท้องตลาดด้วยการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง เช่น หม้อไอน้ำ, เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า จึงเป็นวิธีที่สามารถช่วยแก้ปัญหาผลผลิตได้รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลวทางเลือกสำหรับทดแทนน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตาในอุตสาหกรรม โดยศึกษากรณีการใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันปาล์มดิบในอนาคต

สำหรับการศึกษาด้วยวิธีการทดลอง น้ำมันปาล์มจะถูกอุ่นที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C แล้วพ่นร่วมกับอากาศที่มีความดัน 20, 40 และ 60 psi ผ่านหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรเข้าห้องเผาไหม้ ภายในห้องเผาไหม้มีการติดตั้งเปลวไฟล่อโดยใช้เชื้อเพลิงจาก LPG เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงบันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟด้วยกล้องดิจิทัลและวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo 350 จากนั้นเปรียบเทียบผลกับวิธีจำลองลักษณะการไหลของการเผาไหม้ที่เงื่อนไขเดียวกันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS Fluent โดยออกแบบห้องเผาไหม้ในรูปแบบ 2 มิติที่มีแกนสมมาตร คำนวณโดยใช้ species transport model ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุ่นน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิสูงร่วมกับอากาศความดันสูงส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ดีขึ้น ส่งผลให้เปลวไฟพุ่งได้ไกลและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยผลของอุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงมีส่วนช่วยให้เกิดการเผาไหม้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลของความดัน และเมื่อวิเคราะห์ค่าก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้กรณีต่างๆ พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงและความดันอากาศสูงขึ้น

<b>Thesis Title</b>	A potential study of crude palm oil as fuel for direct combustion
<b>Author</b>	Miss Nilnet Jankaew
<b>Major Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Academic Year</b>	2022

## ABSTRACT

Currently, Thailand supports more alternative energy use especially, biomass energy. The advantages of using biomass energy besides being a renewable energy that releases less emissions to the environment. It is also another way to help farmers when there is an oversupply situation. For example, southern Thailand, where most of the palm plantations in the country, were experiencing oversupply during year 2018-2019. Normally, most palm oil will be purified or added with other substances before being processed into other products such as biodiesel, palm oil for consumption, cosmetics, etc., but when there is an oversupply situation, demand does not match supply. This causes palm growers to face the problem of low product prices. So, accelerating the release of palm oil productions by using it as a fuel for direct combustion, such as boilers, fuel in power plants is a method that can help solve oversupply situation faster compared to other methods. This research aims to study the potential of using crude palm oil as an alternative liquid fuel to replace diesel or fuel oil in industries. Starting with the case of using refined palm oil as fuel as a guideline for studying and developing the use of crude palm oil in the future.

For an experimental study, palm oil is preheated to 140, 160 and 180 °C and then sprayed with air with pressure 20, 40 and 60 psi through a 2 mm diameter nozzle into the combustion chamber. Inside the combustion chamber, there is an installation of an LPG pilot flame. When the system reaches a steady state, the flame profile is captured with a digital camera and the composition of the combustion exhaust gases is analyzed with a Testo 350 gas analyzer. The results were compared with a numerical study of combustion under the same conditions using the computer program ANSYS Fluent by designing the combustion chamber in an axisymmetric 2D with species transport model. The results show that higher preheat temperature and pressure accelerated combustion reactions and lead to high temperature, large size and long flame penetration. For emissions released from combustion, CO and NO<sub>x</sub> tend to decrease when preheat temperature and air pressure are high.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับการช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.มัทธา แวหะยี อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็น ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และเสนอแนวทางในการศึกษาค้นคว้าด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดมา ทำให้วิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำเพิ่มเติมจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ จากเงินงบประมาณแผ่นดินปีงบประมาณ 2565 ที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคำแนะนำและการสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือในงานวิจัยนี้จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

คุณประโยชน์ใดๆ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดา มารดา อาจารย์ ตลอดจนสถานศึกษาที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา และขอมอบแต่ทุกท่านที่มีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นิลเนตร จันทร์แก้ว

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	8
สารบัญตาราง	11
สารบัญรูป	12
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	2
1.2.1 ปาล์มน้ำมัน	2
1.2.2 การสกัดปาล์มน้ำมัน	2
1.2.3 การเผาไหม้	5
1.2.4 องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้	5
1.2.5 ประเภทของการเผาไหม้	6
1.2.6 เชื้อเพลิงเหลว	6
1.2.7 การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว	6
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
1.4 วัตถุประสงค์	12
1.5 ขอบเขตการศึกษา	12
บทที่ 2 วิธีการศึกษา	13
2.1 การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	13
2.1.1 พื้นที่ทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง	13
2.1.2 ความเร็วอากาศและเชื้อเพลิง	13
2.1.3 อัตราการไหลเชิงมวลอากาศและเชื้อเพลิง	13
2.1.4 สมการการเผาไหม้	13
2.1.5 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง	14
2.1.6 อัตราส่วนสมมูล	14
2.2 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยการทดลอง	14
2.2.1 ชุดทดลอง	14
2.2.2 วิธีการทดลอง	16
2.3 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้	16
2.3.2 การตั้งค่า	16
2.3.3 การทดสอบความละเอียดของจำนวนกริด	17
บทที่ 3 ผลการศึกษา	18
3.1 การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	18
3.1.1 พื้นที่ทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง	18
3.1.2 ความเร็วอากาศและเชื้อเพลิง	18
3.1.3 อัตราการไหลเชิงมวลอากาศและเชื้อเพลิง	18
3.1.4 สมการการเผาไหม้	19
3.1.5 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง	19
3.1.6 อัตราส่วนสมมูล	20
3.1.7 ตารางสรุป	20
3.2 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยการทดลอง	21
3.2.1 ลักษณะเปลวไฟ	21
3.2.2 ปริมาณก๊าซไอเสีย	22
3.3 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD)	23
3.3.1 Temperature contour	23
3.3.2 อุณหภูมิเปลวไฟ	24
3.3.3 สัดส่วนมวลน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	25
3.3.4 สัดส่วนมวลออกซิเจน	26
3.3.5 สัดส่วนมวลคาร์บอนไดออกไซด์	27
3.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาด้วยการทดลองกับวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์	28
บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา	30
4.1 สรุปผลการศึกษา	30
4.2 ข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	31
ภาคผนวก	34
ภาคผนวก ก	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข	38
ภาคผนวก ค	52
ภาคผนวก ง	63
ภาคผนวก จ	71
ภาคผนวก ฉ	82
ภาคผนวก ช	84
ประวัติผู้เขียน	97

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350	16
ตารางที่ 2.2 การตั้งค่าแบบจำลอง	17
ตารางที่ 3.1 ปริมาณกรดไขมัน (Fatty acid) ในน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	20
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined palm oil, RPO) ที่อุณหภูมิต่างๆ	20
ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	21
ตารางที่ 3.4 ความยาวเปลวไฟ	21
ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดตามความยาวแกนแบบจำลอง	23



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบปาล์มน้ำมัน	2
รูปที่ 1.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบหีบแยก	3
รูปที่ 1.3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบหีบรวม	4
รูปที่ 1.4 การเผาไหม้ของหัวเผา (Burner)	6
รูปที่ 1.5 ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของสเปรย์	7
รูปที่ 1.6 ชุดทดลอง Hashimoto และคณะ	8
รูปที่ 1.7 ชุดทดลอง Ganjehkaviri และคณะ	8
รูปที่ 1.8 อุณหภูมิพื้นผิวห้องเผาไหม้	8
รูปที่ 1.9 ชุดทดลอง Mahfouz และคณะ	9
รูปที่ 1.10 ชุดทดลอง Mahfouz และคณะ	10
รูปที่ 1.11 ประสิทธิภาพการเผาไหม้	10
รูปที่ 1.12 Contour maps of the cross-sectional spatial average inflame	10
รูปที่ 1.13 ชุดทดลอง Mahfouz และคณะ	11
รูปที่ 1.14 กราฟแสดงอุณหภูมิก๊าซไอเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้	11
รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมชุดทดลอง	15
รูปที่ 2.2 ชุดทดลอง	15
รูปที่ 2.3 แบบจำลองห้องเผาไหม้	16
รูปที่ 2.4 ผลเปรียบเทียบปริมาณก๊าซจากการเผาไหม้ที่จำนวนกริดต่างกัน	17
รูปที่ 3.1 ลักษณะของเปลวไฟ	21
รูปที่ 3.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่วัดได้จากการเผาไหม้	22
รูปที่ 3.3 Temperature contour	23
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดตามความยาวแกนแบบจำลอง	24
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงสัดส่วนมวลน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	25
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงสัดส่วนมวลออกซิเจน	26
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงสัดส่วนมวลคาร์บอนไดออกไซด์	27
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ความดันอากาศต่างๆ	28
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันอากาศต่างๆ	29

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ข้อมูลจากรายงานความเคลื่อนไหวด้านมลพิษของกรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และศูนย์วิจัยด้านพลังงานและอากาศสะอาด (CREA) ระบุมูลค่าความเสียหายด้านมลพิษทางอากาศจากเชื้อเพลิงฟอสซิลสูงถึง 8,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯต่อวันหรือประมาณ 3.3% ของจีดีพีโลก PM 2.5 และโอโซนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ผู้คนทั่วโลกเป็นโรคหอบมากขึ้น ดังนั้น การใช้พลังงานทางเลือก, พลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดจะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดมลพิษทางอากาศได้ [1]

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่ตระหนักถึงความสำคัญของประเด็นข้างต้น โดยในปี 2561 ประเทศไทยใช้พลังงาน 83,691 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมากกว่า 10 ปีและเพิ่มขึ้น 3.7% จากปี 2560 โดยพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลังงานเชิงพาณิชย์ (84.6%) เช่น น้ำมันสำเร็จรูป ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินและไฟฟ้ามีสัดส่วนเพิ่มขึ้น 3.9% และใช้พลังงานทางเลือก (15.4%) เช่น กากอ้อย แกลบ ถ่าน ฟืน และวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเพิ่มขึ้น 2.2% [2] และเนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทางเลือกในประเทศเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นประเทศไทยเริ่มหันมาใช้พลังงานทางเลือกเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะพลังงานจากชีวมวล [3] ซึ่งข้อดีของการพัฒนาพลังงานจากชีวมวลนอกจากจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังเป็นการช่วยเหลือภาคเกษตรกรรมเมื่อผลผลิตล้นตลาดอีกด้วย

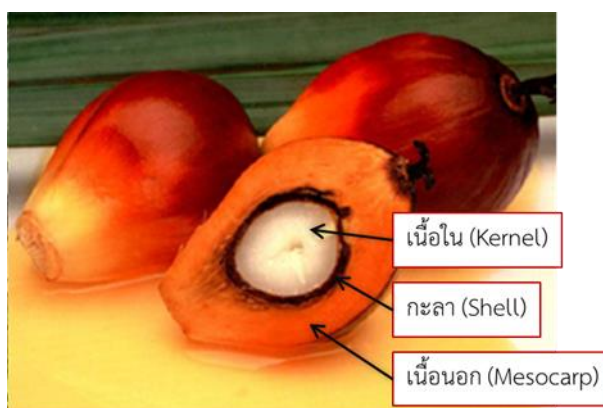
ในช่วงปี 2561-2562 ภาคใต้ของประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกปาล์มส่วนใหญ่ในประเทศประสบปัญหาผลผลิตล้นตลาด โดยเฉพาะในช่วงต้นปีประมาณมีนาคม-พฤษภาคมและช่วงปลายปีประมาณกันยายน-พฤศจิกายนส่งผลให้ปาล์มมีราคาถูก ซึ่งปกติแล้วน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่จะผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้วเติมสารอื่นๆ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมีก่อนแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น [4] เช่น น้ำมันไบโอดีเซล, น้ำมันปาล์มเพื่อบริโภค, เครื่องสำอางค์ เป็นต้น แต่เมื่อเกิดภาวะผลผลิตล้นตลาดส่งผลให้อุปสงค์ไม่สอดคล้องกับอุปทาน ทำให้เกษตรกรผู้ปลูกปาล์มต้องเผชิญปัญหาผลผลิตราคาต่ำ ดังนั้น การเร่งระบายผลผลิตออกจากท้องตลาดด้วยการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง เช่น หม้อไอน้ำ, เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งส่วนเส้นใยปาล์ม, กะลาปาล์มและน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil, CPO) [5] จึงเป็นวิธีที่สามารถช่วยแก้ปัญหาผลผลิตได้รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันดิบเพื่อเป็นเชื้อเพลิงเหลวทางเลือกสำหรับทดแทนน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตาในอุตสาหกรรม โดยศึกษากรณีการใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันปาล์มดิบในอนาคตต่อไป

## 1.2 ทฤษฎีและหลักการ

### 1.2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน คือ ผลที่เกิดจากการผสมพันธุ์ระหว่างดอกตัวเมียกับดอกตัวผู้ หลังจากผสมเกสรแล้วผลปาล์มจะเจริญเติบโตจนถึงเวลา 5-6 เดือนจึงเก็บเกี่ยวได้ ทะลายปาล์ม 1 ทะลายจะมีขนาดประมาณ 35x45 เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับอายุ, สายพันธุ์และความสมบูรณ์ของต้น แต่ละทะลายจะมี 500-4,000 ผล น้ำหนักประมาณ 10-30 กิโลกรัม

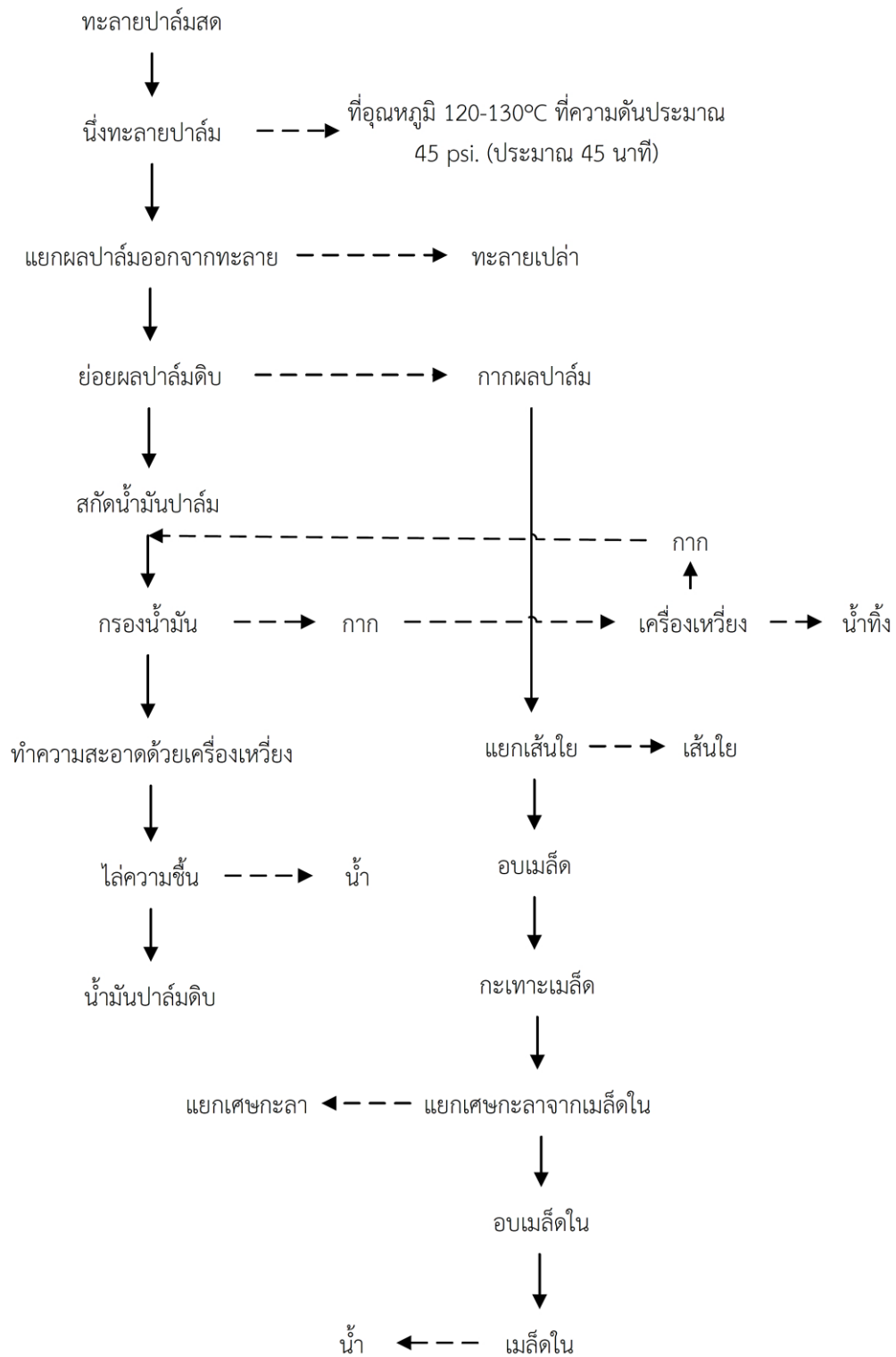
ผลปาล์มน้ำมัน 1 ลูก มีขนาดประมาณ 2-5 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 30 กรัม/ผล โดยชั้นนอกสุดเป็นผิวเปลือก (Exocarp) ซึ่งมีสีแตกต่างกันตามสายพันธุ์ ถัดมาเป็นเนื้อมาก (Mesocarp) มีส่วนประกอบหลักเป็นไฟเบอร์และน้ำมัน CPO (Crude palm oil) คิดเป็นปริมาณ 45-55% ของน้ำหนักทั้งลูก น้ำมันจะมีสีเหลืองจนถึงส้มแดง จุดหลอมเหลว 25-50 °C จัดเป็นน้ำมันชนิดไม่อิ่มตัว ถัดเข้าไปเป็นชั้นของเมล็ด (Seed) หรือกะลาปาล์ม (Shell) ชั้นในสุดเป็นเนื้อใน (Kernel) มีสีขาว ซึ่งชั้นนี้มีส่วนประกอบน้ำมัน CPKO (Crude palm kernel oil) ที่ต่างจากน้ำมันในชั้น Mesocarp มีลักษณะคล้ายน้ำมันมะพร้าว ไม่มีสีหรือสีชาวมเหลือง เป็นน้ำมันอิ่มตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [6]



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบปาล์มน้ำมัน [6]

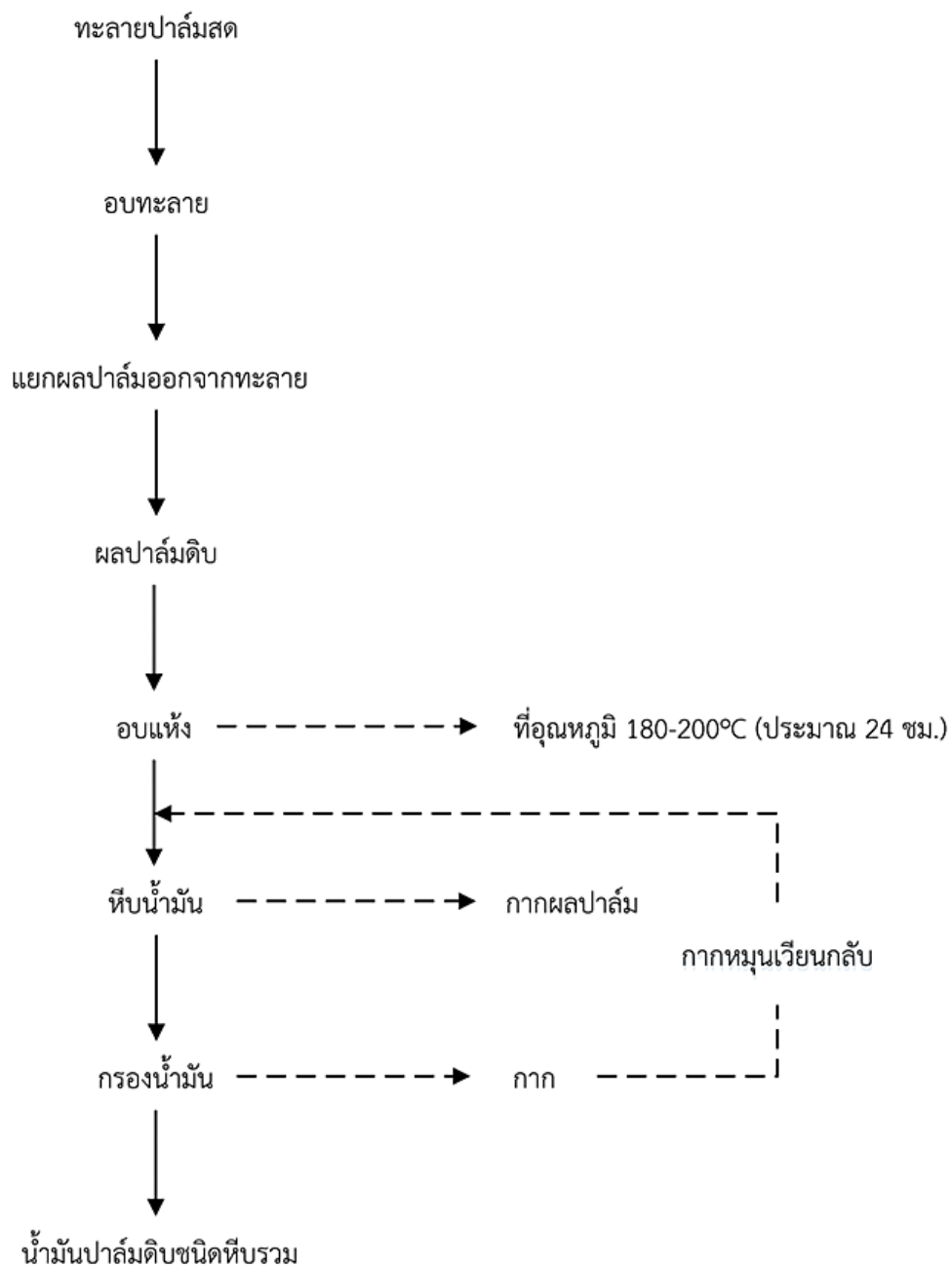
### 1.2.2 การสกัดปาล์มน้ำมัน

กระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมันเพื่อสกัดเป็นน้ำมันปาล์มดิบแบ่งได้ 2 ประเภท ประเภทแรกแบบหีบแยก ดังแสดงกระบวนการในรูปที่ 1.2 จะได้น้ำมันสองชนิด คือ น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil, CPO) จากการสกัดเปลือกนอกของปาล์มน้ำมันและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Crude palm kernel oil, CPKO) จากการสกัดเนื้อของเมล็ดในปาล์มซึ่งโดยทั่วไปจะมีราคาซื้อขายสูงกว่าน้ำมันปาล์มดิบ เนื่องจากน้ำมันมีความสะอาดกว่าและลดขั้นตอนในการทำให้ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ [7,8]



รูปที่ 1.2 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบหีบแยก [7]

ประเภทที่สองเป็นแบบหีบรวม ดังแสดงกระบวนการในรูปที่ 1.3 จะได้น้ำมันผสมระหว่างน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม (Mixed crude palm oil, MCPO)



รูปที่ 1.3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบหีบรวม [7]

โดยสรุปแล้วกระบวนการที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบทั้งสองประเภทประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization) ทำการอบที่อุณหภูมิ 130-135 °C ความดัน 2.5-3 bar ใช้เวลา 50-75 นาที ขั้นตอนนี้จะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในปาล์มและช่วยให้ปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขี้ผลได้ง่าย

2. การแยกผล (Separation) เมื่อส่งทะลายปาล์มเข้าเครื่องแยกผล ทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไป ส่วนผลปาล์มจะถูกย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อแยกส่วนเปลือกออกจากเมล็ด

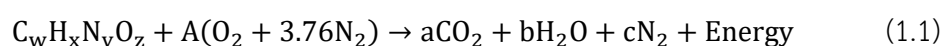
3. การสกัดน้ำมัน (Extraction) โดยการนำส่วนเปลือกมาอบที่อุณหภูมิ 90-100 °C ใช้เวลา 20-30 นาที หลังจากนั้นจะเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จึงได้น้ำมันปาล์มดิบที่ประกอบด้วยน้ำมัน 66%, น้ำ 24% และของแข็ง 10%

4. การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Filtration) น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัดจะถูกส่งต่อไปยังถังกรองเพื่อแยกของแข็งและน้ำออกจากกัน จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดและไล่น้ำออกเพื่อทำให้ปาล์มแห้ง สุดท้ายจึงส่งเข้าถังเก็บน้ำมันเพื่อรอการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป

เมื่อผ่านกระบวนการสกัดแล้ว น้ำมันปาล์มดิบจะแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วนด้านบนเป็นของเหลวสีส้มแดง (Crude Palm Oil Olein) ประมาณ 30-50% ส่วนล่างเป็นไขสีเหลืองส้ม (Crude Palm Oil Stearin) ประมาณ 50-70% จากนั้นน้ำมันปาล์มที่ได้จะเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้บริสุทธิ์หรือจะนำไปแยกส่วน (Fractionation) เพื่อให้ได้คุณสมบัติแตกต่างกันไป [9-12]

### 1.2.3 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแบบเร็วระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน จากนั้นจะปลดปล่อยพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูงและพลังงานแสงออกมาซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้ อย่างง่าย สามารถแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้



จากสมการที่ 1 พจน์ด้านซ้ายเรียกว่าสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยเชื้อเพลิง (CH<sub>4</sub>) และอากาศ สำหรับพจน์ด้านขวาเรียกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), น้ำ (H<sub>2</sub>O), ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และพลังงาน

สมการข้างต้นเป็นสมการการเผาไหม้ที่ไม่ซับซ้อน โดยเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบเดียวและมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (มีออกซิเจนมากเพียงพอที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์) แต่ความเป็นจริงแล้วสารตั้งต้นอาจมีหลายองค์ประกอบและเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในบางช่วงหรือบางส่วนของบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ ทำให้ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้มีองค์ประกอบอื่นๆที่มากขึ้น [13-15]

### 1.2.4 องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้

องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ คือ เชื้อเพลิงกับออกซิเจน การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในสภาวะปกติ (อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ) จะไม่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ต้องมีความร้อนเข้ามาช่วย จึงสามารถสรุปองค์ประกอบที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ ดังนี้

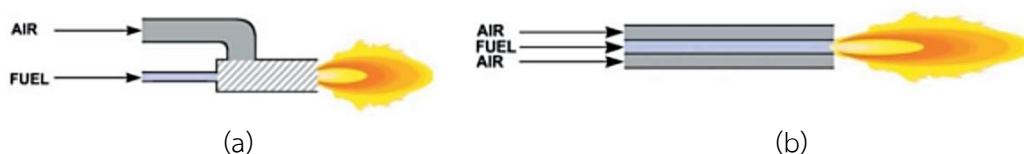
1. เชื้อเพลิง (Fuel) องค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ คือ คาร์บอน (C) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ( $C_xH_y$ ) โดยสามารถแบ่งประเภทเชื้อเพลิงตามสถานะได้ 3 ประเภท คือ เชื้อเพลิงแข็ง, เหลวและก๊าซ

2. ออกซิเจน ( $O_2$ ) ในกระบวนการทางเคมีเรียกออกซิเจนว่า ออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) ในทางปฏิบัติออกซิไดเซอร์ส่วนใหญ่จะใช้อากาศเนื่องจากสามารถหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ส่วนประกอบของออกซิเจนในอากาศมีเพียง 21% โดยน้ำหนักเท่านั้นส่วนที่เหลือเป็นไนโตรเจน

3. ความร้อน (Heat) ความร้อนที่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ คือความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิถึงค่าที่เชื้อเพลิงนั้นๆ สามารถที่จุดติดไฟเองได้ ในเริ่มต้นการเผาไหม้ (Ignition) จะใช้วิธีการจุดให้ติดไฟจากเปลวไฟล่อ (Pilot flame) หรือทำให้เกิดประกายไฟ เช่น การสปาร์คของหัวเทียนในเครื่องยนต์สันดาปภายใน จากนั้นเปลวเพลิงจะลามขยายไปยังบริเวณที่มีเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์

### 1.2.5 ประเภทของการเผาไหม้

ในที่นี้จะกล่าวถึงการเผาไหม้ที่เกี่ยวข้องกับการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิไดเซอร์ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในสถานะแก๊สจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเผาไหม้แบบผสมมาก่อน (Premixed combustion) และการเผาไหม้แบบแพร่ (Non-premixed or Diffusion combustion) โดยการเผาไหม้แบบผสมมาก่อนจะต้องให้ส่วนผสมทั้งสองชนิดผสมกันในระดับโมเลกุลก่อนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ส่วนการเผาไหม้แบบแพร่เป็นการแยกระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิไดเซอร์ออกจากกันก่อนถึงบริเวณที่มีการเผาไหม้ (Combustion zone) จากนั้นจะเกิดการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิไดเซอร์ในบริเวณที่มีการเผาไหม้โดยกลไกการแพร่ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การเผาไหม้ของหัวเผา (Burner) แบบ (a) Premixed, (b) Non-premixed [16]

### 1.2.6 เชื้อเพลิงเหลว

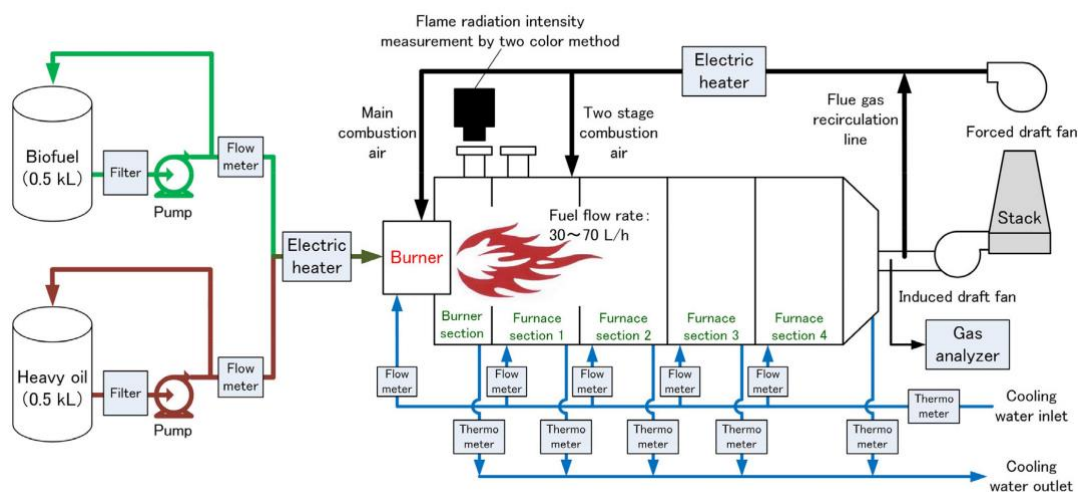
เชื้อเพลิงเหลว คือ เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของเหลวเมื่ออยู่ในสภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง โดยส่วนมากแล้วเชื้อเพลิงเหลวมาจากแหล่งกำเนิดจากฟอสซิลอยู่ในรูปน้ำมันดิบ (Crude oil) แล้วนำมากลั่น ซึ่งจะได้น้ำมันชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันก๊าซ, น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นและความผันผวนของราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกจึงมีการพัฒนาเชื้อเพลิงเหลวจากวัตถุดิบอื่น ๆ ได้แก่ อินทรีย์สารซึ่งได้เชื้อเพลิงเหลวชีวภาพ (Bio-fuel oil) เช่น ไบโอดีเซล, เอทานอลและอินทรีย์สาร เช่น ขยะพลาสติกหรือยางรถยนต์ [16-17]

### 1.2.7 การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว

การพ่นเชื้อเพลิงผ่านหัวฉีด (Nozzle) บางครั้งจะเรียกว่า “สเปรย์” เป็นการฉีดเชื้อเพลิงเพื่อให้มีขนาดเล็กแล้วเข้าผสมกับออกซิไดเซอร์ (ส่วนใหญ่เป็นอากาศ) รูปที่ 1.5 แสดงลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของสเปรย์เชื้อเพลิงเหลวจะถูกฉีดผ่านรูหัวฉีด ทำให้เกิดเป็นฝอยละอองเล็กๆแล้ว

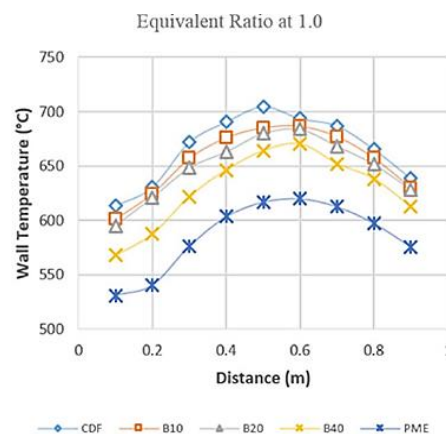
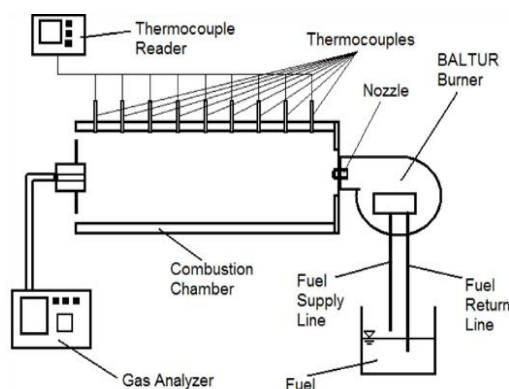






รูปที่ 1.6 ชุดทดลอง Hashimoto และคณะ [19]

Ganjekaviri และคณะ [20] ได้ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันดีเซลที่ส่วนผสมต่างๆ ในการทดลองได้ใช้หัวเผาเชื้อเพลิงเหลว (Oil burner) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 โดยวัดอุณหภูมิพื้นผิวของห้องเผาไหม้ตามความยาวของเปลวไฟที่ตำแหน่งต่างๆ และวัดคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย ในการทดลองได้ผสมน้ำมันไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลที่ส่วนผสม 10:90 (B10), 20:80 (B20), 40:60 (B40) นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีน้ำมันดีเซลธรรมดา (Conventional diesel fuel, CDF) และน้ำมันไบโอดีเซลล้วน (Palm methyl ester, PME)



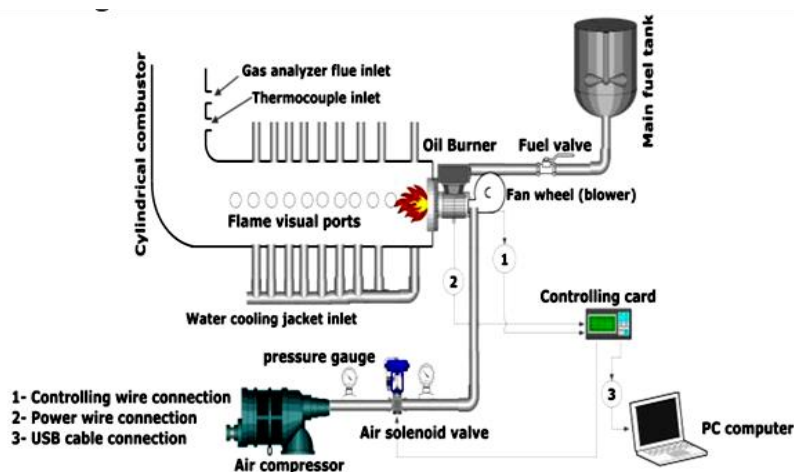
รูปที่ 1.7 ชุดทดลอง Ganjehkaviri และคณะ [20] รูปที่ 1.8 อุณหภูมิพื้นผิวห้องเผาไหม้ [20]

จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนสมมูล  $ER=1$  อุณหภูมิพื้นผิวของห้องเผาไหม้ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมลงในน้ำมันดีเซล โดยกรณีน้ำมันดีเซลธรรมดา (CDF) ทำให้อุณหภูมิมบนพื้นผิวของห้องเผาไหม้สูงสุดและน้ำมันไบโอดีเซล (PME) ทำให้อุณหภูมิมบนพื้นผิวของห้องเผาไหม้ต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 1.8 สำหรับการวัดไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) และคาร์บอนมอน

นอกไซด์ (CO) ในก๊าซไอเสียพบว่ามีความลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมลงในน้ำมันดีเซล

Kang และคณะ [21] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันดิบจากเมล็ดสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงใช้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยศึกษาผลของการอุ่นน้ำมันดิบจากเมล็ดสบู่ดำในช่วง 50 -100 °C ที่มีผลต่อความเสถียรของเปลวไฟโดยใช้หัวเผาอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว จากการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิที่สามารถจุดติดไฟและทำให้เปลวไฟมีความเสถียรคือที่อุณหภูมิ 90-100 °C

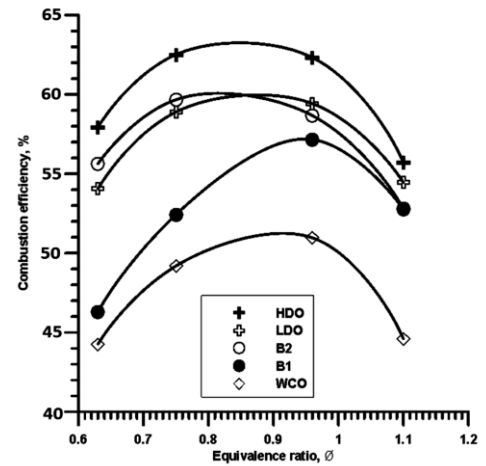
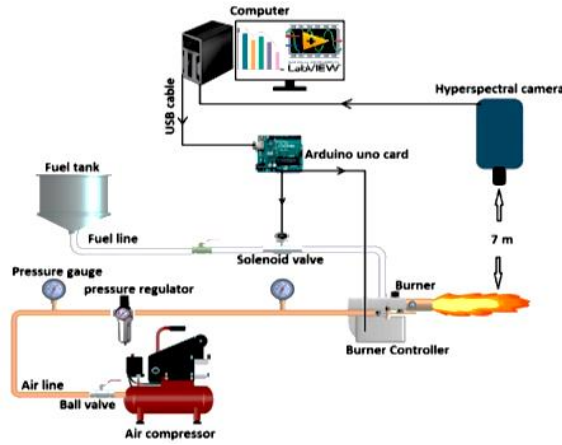
Mahfouz และคณะ [22] ได้ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุนวน (Swirled burner) ดังแสดงในรูปที่ 1.9 โดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว (Waste cooking oil, WCO) กับน้ำมันดีเซล (Light diesel oil, LCO) เป็นเชื้อเพลิง ก่อนเข้าเตาเผาเชื้อเพลิงทั้งสองจะถูกอุ่นจนมีอุณหภูมิ 90 °C และ 80 °C ตามลำดับเพื่อลดความหนืด (Viscosity) จากนั้นจะถูกเผาที่ความดันของ Primary air ต่างกัน คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 bar ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า WCO ก่อให้เกิด  $\text{NO}_x$  และ CO ในปริมาณที่น้อยกว่า



รูปที่ 1.9 ชุดทดลอง Mahfouz และคณะ [22]

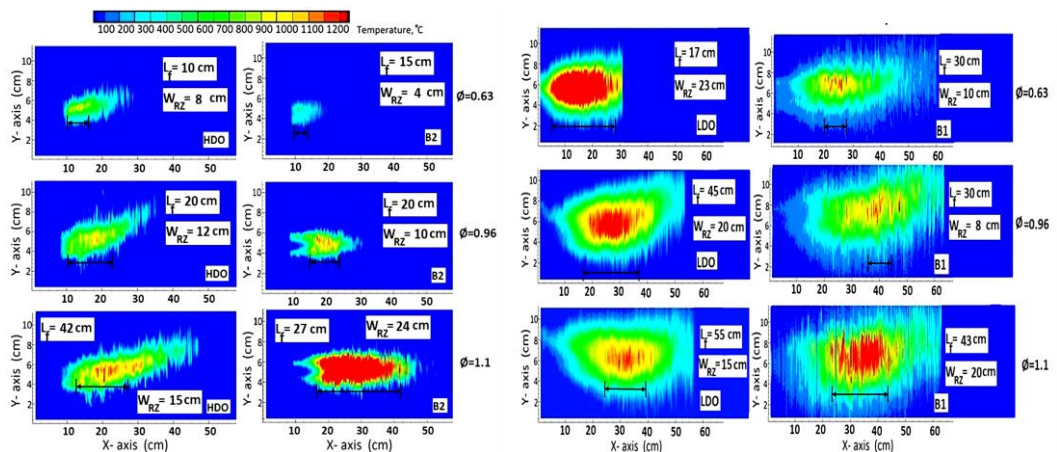
Mahfouz และคณะ [23] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสเปกโตรสโคปีของเปลวไฟของน้ำมันดีเซล (Heavy diesel oil, HDO), น้ำมันดีเซล (Light diesel oil, LDO), น้ำมันพืชใช้แล้ว (Waste cooking oil, WCO), B1 และ B2 ที่ใช้ในหัวเผาอุตสาหกรรมซึ่ง B1 และ B2 เป็นส่วนผสมระหว่าง LDO กับ WCO และ HDO กับ WCO ตามลำดับ โดยใช้กล้อง Hyperspectral ตรวจสอบลักษณะของเชื้อเพลิง กำหนดอัตราส่วนผสม 0.63, 0.75, 0.96 และ 1.1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.10 เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ พบว่าที่อัตราส่วนผสม 0.85 HDO, LDO และ B1 ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 63, 60 และ 60% ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติการแผ่รังสีของเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 1.11 นอกจากนี้ได้วิเคราะห์ Contour map ของอุณหภูมิเชื้อเพลิง พบว่าเชื้อเพลิงผสม B2 ให้เปลวไฟขนาดใหญ่และมีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ HDO เนื่องจากมีส่วนประกอบออกซิเจนมากกว่า และเนื่องจาก LDO และ B1 มีค่า Heating value ต่ำกว่า HDO และ B2 จึงให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้เกิดการระเหยและผสมกันได้เร็ว ทำให้เปลวไฟมีขนาดสั้นกว่าดังแสดงในรูปที่

1.12 ส่วนน้ำมันพืชให้เปลวไฟค่อนข้างแ่ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงแตกตัวเป็นอะตอมอิสระได้ยากจึงทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถผสมเข้ากันได้



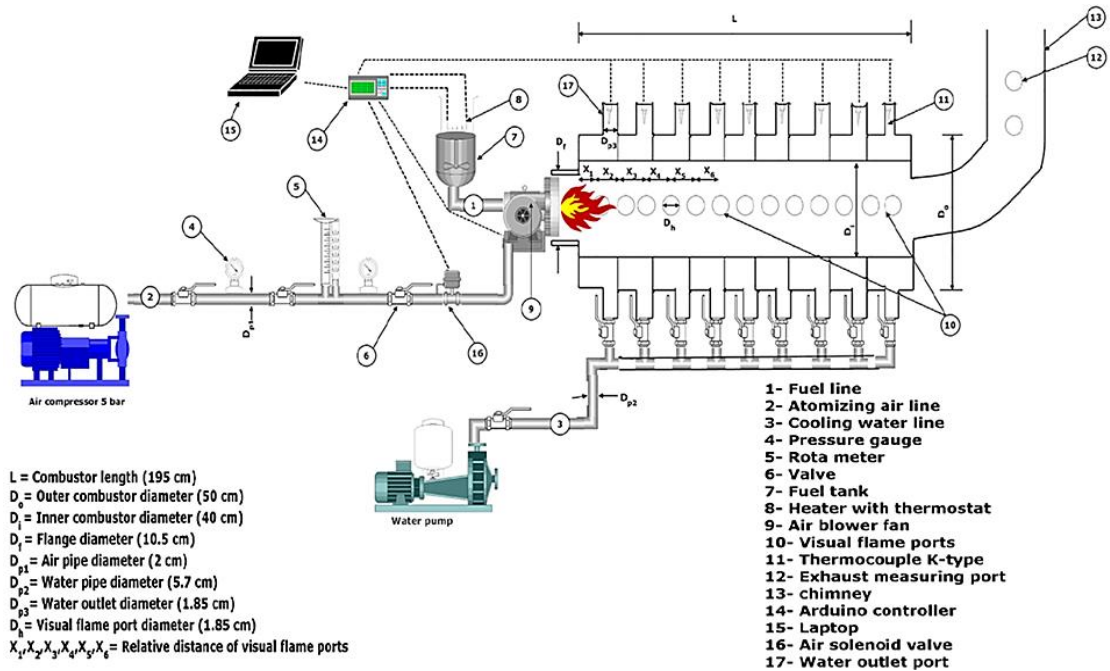
รูปที่ 1.10 ชุดทดลอง Mahfouz และคณะ [23]

รูปที่ 1.11 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ [23]

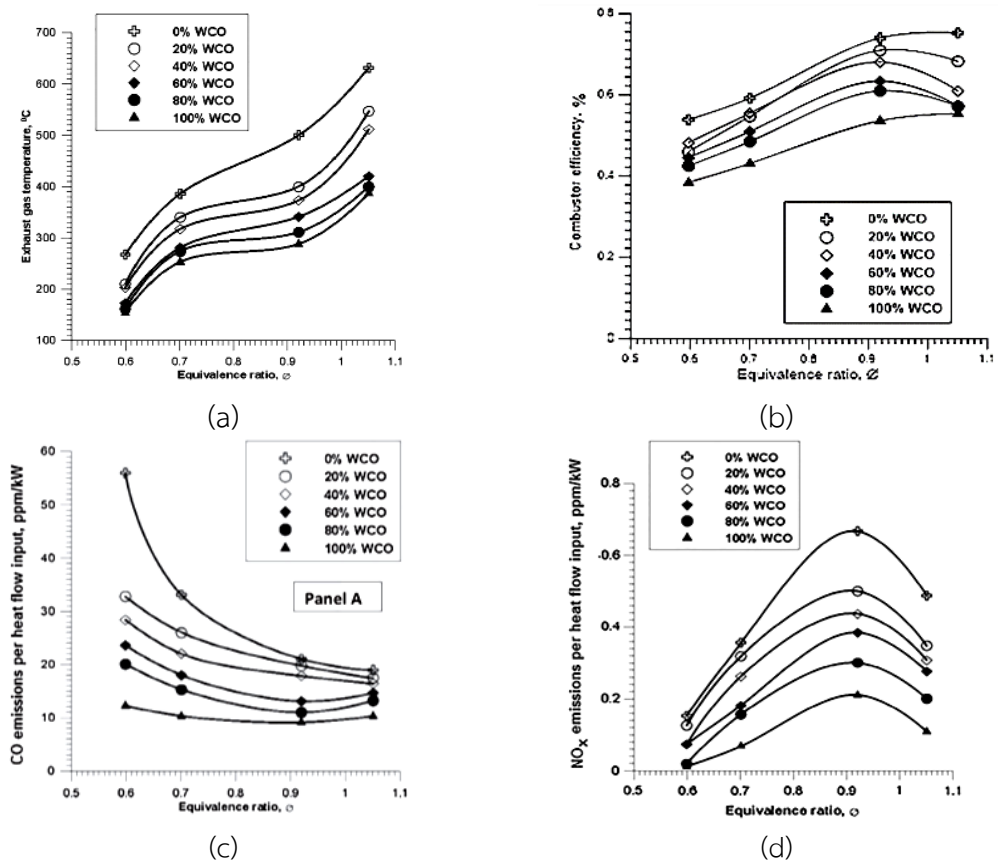


รูปที่ 1.12 Contour maps of the cross-sectional spatial average inflame [23]

นอกจากนั้น Mahfouz และคณะ [24] ได้ศึกษาลักษณะการเผาไหม้และก๊าซไอเสียของเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้ว (Waste cooking oil, WCO) กับน้ำมันดีเซล (Light diesel oil, LCO) ดังแสดงรายละเอียดชุดทดลองในรูปที่ 1.13 โดยผสมน้ำมันพืชที่ใช้แล้วในสัดส่วน 0, 20, 40, 60, 80 และ 100% ตามลำดับ อัตราส่วนสมมูลกำหนดให้อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1.05 จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำมันพืชใช้แล้วในน้ำมันดีเซล นอกจากนี้การเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำมันพืชที่ใช้แล้วในน้ำมันดีเซลยังส่งผลให้มลพิษ (Emission) ในก๊าซไอเสีย เช่น CO, NO<sub>x</sub> ลดลงอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 1.14 โดยส่วนผสมที่แนะนำคือผสมน้ำมันพืชที่ใช้ 20% ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



รูปที่ 1.13 ชุดทดลอง Mahfouz และคณะ [24]



รูปที่ 1.14 กราฟแสดง (a) อุณหภูมิแก๊สไอเสีย, (b) ประสิทธิภาพการเผาไหม้, (c) CO และ (d) NO<sub>x</sub> [24]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. น้ำมันดิบจากพืชควรถูกอุ่นที่อุณหภูมิ 80-100 °C ก่อนการเผาไหม้
2. ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ เช่น  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  ลดลง เมื่อผสมน้ำมันดิบจากพืชกับน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีส่วนประกอบไนโตรเจนและซัลเฟอร์น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล
3. เชื้อเพลิงที่ใช้ในศึกษาส่วนใหญ่ คือ น้ำมันพืชใช้แล้ว, น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ, น้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยที่ศึกษากรณีการเผาไหม้น้ำมันปาล์มและการศึกษาการเผาไหม้ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์มีน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษากรณีการใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ เป็นต้น โดยเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันปาล์มดิบในอนาคตต่อไป

#### 1.4 วัตถุประสงค์

- 1.4.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ส่งผลต่อลักษณะการเผาไหม้
- 1.4.2 เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

#### 1.5 ขอบเขตการศึกษา

1.5.1 การศึกษานี้กำหนดการเผาไหม้เชื้อเพลิง-อากาศเป็นแบบการเผาไหม้แบบแพร่ (Non-premixed or Diffusion combustion)

1.5.1 กรณีการศึกษาการเผาไหม้ด้วยวิธีการทดลอง ใช้หัวฉีด W-77 spray gun ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรสำหรับพ่นเชื้อเพลิงน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้

1.5.2 กรณีการศึกษาการเผาไหม้ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากน้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันหลายชนิด ดังนั้นจึงใช้สูตรโมเลกุลและคุณสมบัติอื่นๆ ของกรดโอเลอิก (Oleic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีสัดส่วนเยอะที่สุดเป็นสารตั้งต้นสำหรับการเผาไหม้

## บทที่ 2 วิธีการศึกษา

### 2.1 การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

เริ่มต้นด้วยการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง (Inlet diameter, m), อัตราการไหลอากาศและเชื้อเพลิง (Volume flow rate, lpm) แล้วคำนวณหาความเร็ว (Velocity, m/s) และอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate, kg/s) เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้จริงดังแสดงในสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

จากนั้นนำสูตรโมเลกุลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มาดุลสมการการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ดังแสดงในสมการที่ 2.4 แล้วคำนวณหาอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงตามทฤษฎี ดังแสดงในสมการที่ 2.5 สุดท้ายคำนวณหาค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

#### 2.1.1 พื้นที่ทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง (Area, A)

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.1)$$

โดย A คือ พื้นที่ทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง ( $m^2$ )  
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง ( $m^2$ )

#### 2.1.2 ความเร็วอากาศและเชื้อเพลิง (Velocity, v)

$$\dot{V} = vA \quad (2.2)$$

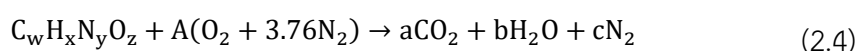
โดย  $\dot{V}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศและเชื้อเพลิง ( $m^3/s$ )  
v คือ ความเร็วอากาศและเชื้อเพลิง ( $m/s$ )

#### 2.1.3 อัตราการไหลเชิงมวลอากาศและเชื้อเพลิง (Mass flow rate, $\dot{m}$ )

$$\dot{m} = \rho vA \quad (2.3)$$

โดย  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลอากาศ ( $kg/s$ )  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นอากาศและเชื้อเพลิง ( $kg/m^3$ )

#### 2.1.4 สมการการเผาไหม้



### 2.1.5 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel ratio, A/F)

$$A/F = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} = \frac{(NM)_{\text{air}}}{(NM)_{\text{C}} + (NM)_{\text{H}} + (NM)_{\text{N}} + (NM)_{\text{O}}} \quad (2.5)$$

โดย	A/F	คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel ratio)
	$m_{\text{air}}$	คือ มวลอากาศ (kg)
	$m_{\text{fuel}}$	คือ มวลเชื้อเพลิง (kg)
	N	คือ จำนวนกรัมของธาตุ (Normality)
	M	คือ จำนวนโมลของธาตุ (Molarity)

### 2.1.6 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ER)

$$ER = \frac{(A/F)_{\text{stoich}}}{(A/F)_{\text{actual}}} \quad (2.6)$$

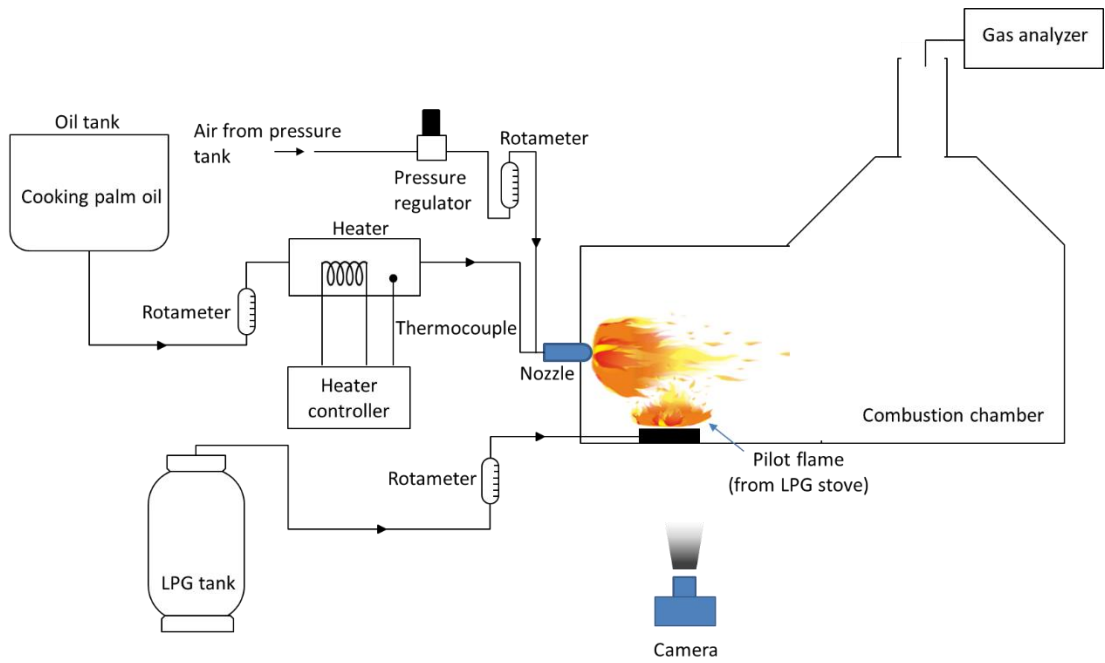
โดย	ER	คือ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)
	$(A/F)_{\text{stoich}}$	คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี
	$(A/F)_{\text{actual}}$	คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้จริง

## 2.2 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยการทดลอง

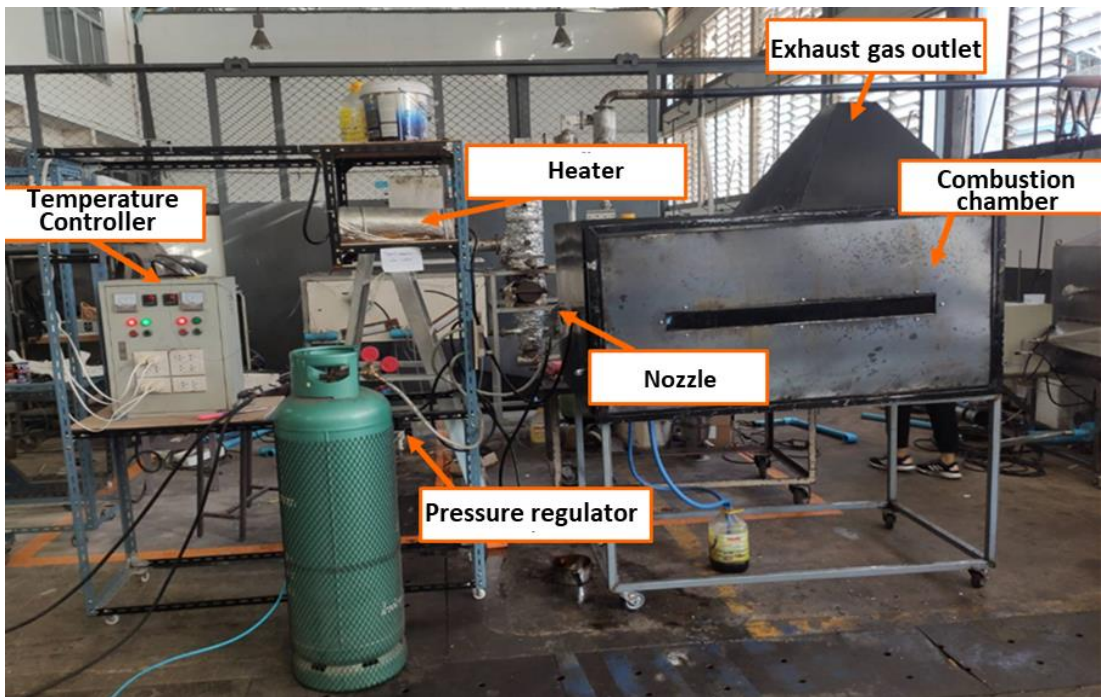
### 2.2.1 ชุดทดลอง

ไดอะแกรมชุดทดลองแสดงในรูปที่ 2.1 และชุดทดลองแสดงในรูปที่ 2.2 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากถังจะไหลผ่านโรตاميเตอร์เพื่อควบคุมอัตราการไหล ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชุดฮีทเตอร์ให้ความร้อนแก่น้ำมัน โดยมีชุดควบคุมกำลังของฮีทเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิการอุ่นน้ำมัน สุดท้ายน้ำมันจะไหลเข้าหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (รายละเอียดหัวฉีดแสดงในภาคผนวก ก) น้ำมันจะถูกผสมกับอากาศและพ่นออกมาเป็นละอองสเปรย์ โดยอากาศก่อนที่ไหลเข้าหัวฉีดมีความดันสูง จากนั้นจะถูกปรับความดันให้ลดลงโดยใช้ Pressure regulator และไหลผ่านโรตاميเตอร์เพื่อควบคุมอัตราการไหล ภายในห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ได้มีการติดตั้งเปลวไฟล่อ (Pilot Flame) เพื่อใช้ในการจุดน้ำมันปาล์มให้สามารถติดไฟ โดยเปลวไฟล่อใช้เชื้อเพลิงจาก LPG นอกจากนี้ได้ควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจาก LPG เพื่อให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเปลวไฟล่อคงที่ตลอดการทดลอง





รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมชุดทดลอง



รูปที่ 2.2 ชุดทดลอง



## 2.2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้นำน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ขายตามท้องตลาดเป็นเชื้อเพลิง โดยกำหนดตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิการอุ่นน้ำมันปาล์มและความดันอากาศ, ตัวแปรตาม คือ ลักษณะเปลวไฟและปริมาณก๊าซไอเสีย การทดลองจะอุ่นน้ำมันปาล์มให้มีอุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C และปรับความดันอากาศที่ไหลเข้าหัวฉีดที่ 20, 40 และ 60 psi จากนั้นฉีดเข้าห้องเผาไหม้เหนือเปลวไฟล่อ (Pilot flame) รอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วจึงทำการบันทึกภาพลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟด้วยกล้องดิจิทัลและวัดปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นบริเวณปล่องควันเหนือห้องเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350 คุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

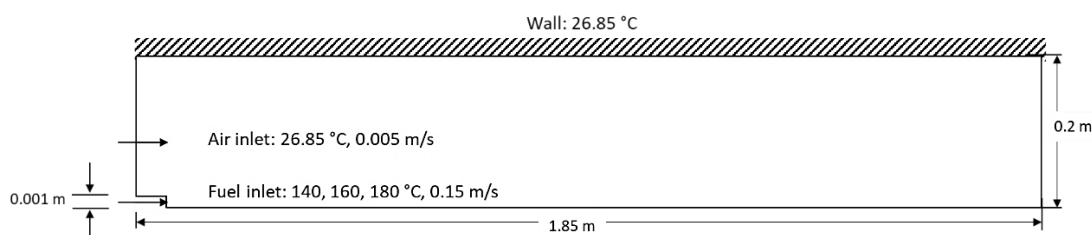
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350

		Accuracy
O <sub>2</sub>	(0 to 25 Vol%)	± 0.8 Vol.%
CO <sub>2</sub>	(0 to 50 Vol%)	± 0.3 Vol.%
CO	(0 to 10,000 ppm)	± 10 ppm
NO	(0 - 4,000 ppm)	± 5 ppm
NO <sub>2</sub>	(0 - 500 ppm)	± 5 ppm
SO <sub>2</sub>	(0 - 5,000 ppm)	± 5 ppm

## 2.3 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD)

### 2.3.1 แบบจำลองการเผาไหม้

ห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ขนาด 40×185 เซนติเมตรจะถูกจำลองแบบ 2 มิติเพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 2019 R3 โดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าเชื้อเพลิง 2 มิลลิเมตร และอุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิง 140, 160 และ 180 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองห้องเผาไหม้

### 2.3.2 การตั้งค่า

กำหนด 2D space แบบ Axisymmetric เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองห้องเผาไหม้ในรูปแบบ 2 มิติที่มีแกนสมมาตร โดยใช้ Viscous model แบบ k-epsilon (2 eqn) จากนั้นกำหนดทางเข้าอากาศ (Air inlet), ทางเข้าเชื้อเพลิง (Fuel inlet), ผนังห้องเผาไหม้ (Wall) และทางออกอากาศและก๊าซ (Pressure outlet) และกำหนดเชื้อเพลิงให้อยู่ในสถานะก๊าซเพื่อง่ายต่อการคำนวณ โดยใช้ Species

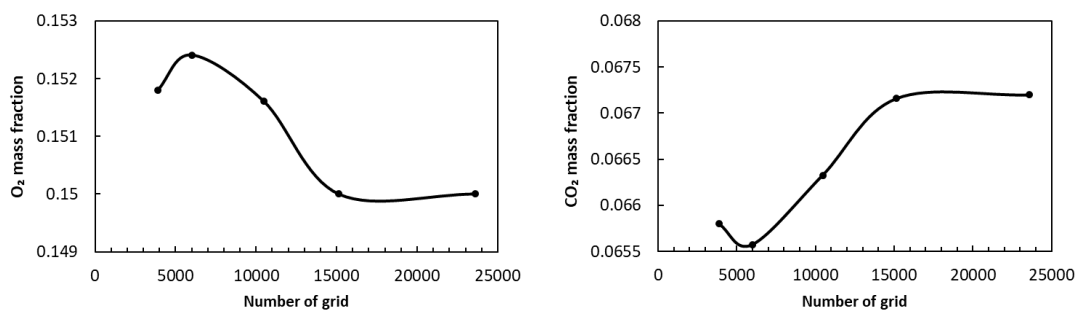
transport model, Mixture material คือ Palm oil-air ดังแสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับรูปแบบการคำนวณจะใช้วิธี Semi-Implicit Method for Pressure-Linked (SIMPLE) ด้วย Second order upwind scheme กำหนดค่าความผิดพลาดของคำตอบของสมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องกำหนดให้น้อยกว่า  $1 \times 10^{-4}$

ตารางที่ 2.2 การตั้งค่าแบบจำลอง

Property	Value
2D space	Axisymmetric
Viscous model	k-epsilon (2eqn)
Species model	Species transport
Reactions	Volumetric
Mixture material	Palm oil-Air
Turbulence-chemistry Interaction	Eddy-Dissipation

### 2.3.3 การทดสอบความละเอียดของจำนวนกริด (Grid dependency test)

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ pressure outlet โดยเปรียบเทียบผลจากการปรับความละเอียดของจำนวนกริดที่กรณีอุณหภูมิอ่อนเชื้อเพลิง 140 °C และความดันอากาศ 20 psi พบว่าจำนวน 15000 กริดให้ผลการศึกษาใกล้เคียงกับกริด 23000 กริดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้นจึงใช้กริด 15000 กริดสำหรับการศึกษานี้ เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ



(a)

(b)

รูปที่ 2.4 ผลเปรียบเทียบปริมาณก๊าซจากการเผาไหม้ที่จำนวนกริดต่างกัน (a) ออกซิเจนและ (b) คาร์บอนไดออกไซด์

### บทที่ 3 ผลการศึกษา

#### 3.1 การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

##### 3.1.1 พื้นที่ทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง (Area, A)

กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิง 40 และ 0.2 เซนติเมตรตามลำดับ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.1 จะได้

$$A_{\text{air}} = \frac{\pi}{4}(0.4 - 0.002)^2 = 0.124 \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

$$A_{\text{fuel}} = \frac{\pi}{4}(0.002)^2 = 3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

โดย  $A_{\text{air}}$  คือ พื้นที่ทางเข้าอากาศ ( $\text{m}^2$ )  
 $A_{\text{fuel}}$  คือ พื้นที่ทางเข้าเชื้อเพลิง ( $\text{m}^2$ )

##### 3.1.2 ความเร็วอากาศและเชื้อเพลิง (Velocity, v)

กำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศและเชื้อเพลิง 40 และ 0.03 lpm ตามลำดับ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.2 จะได้

$$v_{\text{air}} = \frac{40 \text{ lpm}}{0.124 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 0.005 \text{ m/s} \quad (3.3)$$

$$v_{\text{fuel}} = \frac{0.03 \text{ lpm}}{3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 0.15 \text{ m/s} \quad (3.4)$$

โดย  $v_{\text{air}}$  คือ ความเร็วอากาศ ( $\text{m/s}$ )  
 $v_{\text{fuel}}$  คือ ความเร็วเชื้อเพลิง ( $\text{m/s}$ )

##### 3.1.3 อัตราการไหลเชิงมวลอากาศและเชื้อเพลิง (Mass flow rate, $\dot{m}$ )

คำนวณหาอัตราไหลเชิงมวลอากาศ โดยใช้ค่าพื้นที่ทางเข้าอากาศและความเร็วอากาศที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ค่าความหนาแน่นอากาศ  $1.184 \text{ kg/m}^3$  ที่  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  แทนค่าในสมการที่ 2.3 จะได้

$$\dot{m}_{\text{air}} = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.005 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.124 \text{ m}^2 = 7.89 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (3.5)$$

คำนวณหาอัตราไหลเชิงมวลเชื้อเพลิง โดยใช้ค่าพื้นที่ทางเข้าเชื้อเพลิงและความเร็วเชื้อเพลิง ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ค่าความหนาแน่นเชื้อเพลิง 834.2, 825.9 และ 818 kg/m<sup>3</sup> ที่ 140, 160 และ 180 °C ตามลำดับ แทนค่าในสมการที่ 2.3 จะได้

$$\dot{m}_{\text{fuel},140\text{ }^{\circ}\text{C}} = 834.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 4.03 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (3.6)$$

$$\dot{m}_{\text{fuel},160\text{ }^{\circ}\text{C}} = 825.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 3.99 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (3.7)$$

$$\dot{m}_{\text{fuel},180\text{ }^{\circ}\text{C}} = 818 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 3.95 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (3.8)$$

โดย  $\dot{m}_{\text{air}}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลอากาศ (kg/s)  
 $\dot{m}_{\text{fuel}}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลเชื้อเพลิง (kg/s)

### 3.1.4 สมการการเผาไหม้

การศึกษานี้ใช้กรดโอเลอิก (Oleic acid) เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากเป็นกรดไขมันที่มีสัดส่วนมากที่สุดในน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 3.1 [25] โดยมีสูตรโมเลกุล C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub> (Mw = 282.46 g/mol) [26] และคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 [27] นำไปแทนในสมการที่ 2.4 จะได้สมการการเผาไหม้ คือ



### 3.1.5 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel ratio, A/F)

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎีคำนวณได้จากความสัมพันธ์สมการการเผาไหม้แทนค่าในสมการที่ 2.3 จะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี 12.46 หมายถึงอัตราส่วนอากาศ 12.46 ส่วนต่อเชื้อเพลิง 1 ส่วน ดังแสดงในสมการที่ 3.10

$$A/F_{\text{stoich}} = \frac{25.5 \times 4.76 \times 28.96 \text{ g/mol}}{(18 \times 12) + (34 \times 1) + (2 \times 16) \text{ g/mol}} = 12.46 \quad (3.10)$$

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้จริงคำนวณได้จากความสัมพันธ์อัตราไหลเชิงมวลอากาศและเชื้อเพลิง จะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้จริง 1.97 หมายถึงอัตราส่วนอากาศ 1.97 ส่วนต่อเชื้อเพลิง 1 ส่วน ดังแสดงในสมการที่ 3.11

$$A/F_{\text{actual}} = \frac{0.000789 \text{ kg/s}}{0.0004 \text{ kg/s}} = 1.97 \quad (3.11)$$

### 3.1.6 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ER)

คำนวณหาอัตราส่วนสมมูล โดยแทนค่า  $(A/F)_{\text{actual}}$  และ  $(A/F)_{\text{stoich}}$  ในสมการที่ 2.6 จะได้ อัตราส่วนสมมูล 6.32 ดังแสดงในสมการที่ 3.12

$$ER = \frac{12.46}{1.97} = 6.32 \quad (3.12)$$

### 3.1.7 ตารางสรุป

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณกรดไขมัน (Fatty acid) ในน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ [25], ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง คือ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined palm oil, RPO) ที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C [27] และตารางที่ 3.3 แสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งได้จากการคำนวณข้างต้น

**ตารางที่ 3.1** ปริมาณกรดไขมัน (Fatty acid) ในน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

Fatty Acid	RPO
Capric acid (C10:0)	0.11 ±0.03
Lauric acid (C12:0)	1.58 ±0.05
Myristic acid (C14:0)	4.74 ±0.02
Palmitic acid (C16:0)	1.55 ±0.01
Palmitoleic (C16:1)	12.50 ±0.03
Stearic acid (C18:0)	1.82 ±0.04
Oleic acid (C18:1)	76.27 ±0.05
Linoleic acid (C18:2)	0.16 ±0.06
Linolenic acid (C18:3)	0.08 ±0.03
Arachidic acid (C20:0)	0.82 ±0.06
Erucic acid (C22:1)	0.37 ±0.04

**ตารางที่ 3.2** คุณสมบัติน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined palm oil, RPO) ที่อุณหภูมิต่างๆ [27]

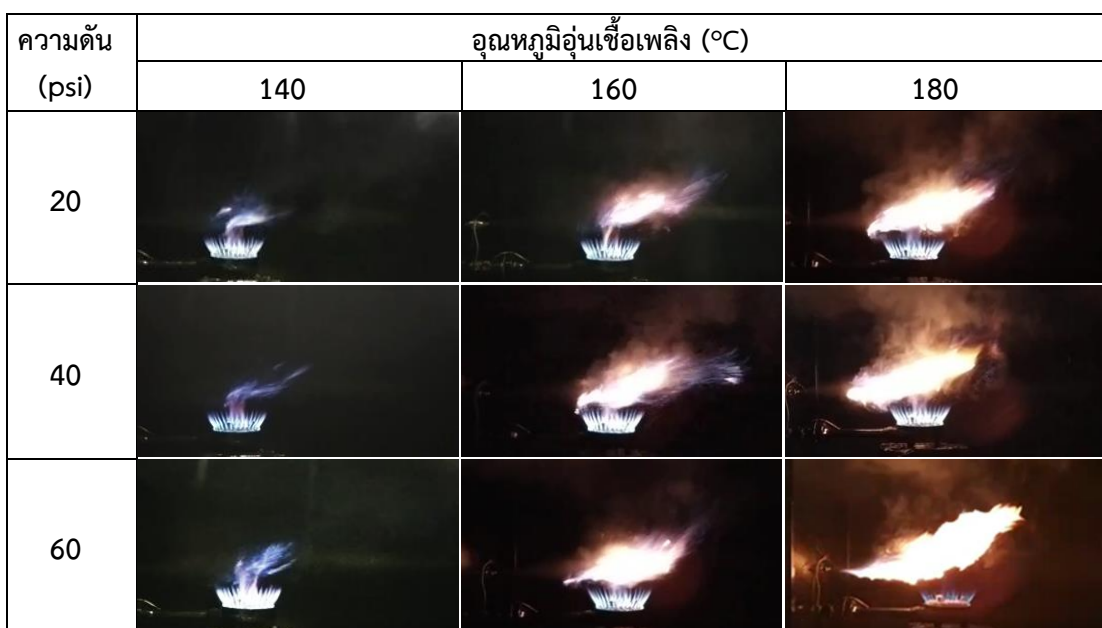
คุณสมบัติ	อุณหภูมิ RPO (°C)		
	140	160	180
Molecular formula	$C_{18}H_{34}O_2$	$C_{18}H_{34}O_2$	$C_{18}H_{34}O_2$
MW (g/mol)	282.47	282.47	282.47
Density (kg/m <sup>3</sup> )	834.2	825.9	818
C <sub>p</sub> (j/kg·K)	2214	2284	2358
Thermal cond. (w/m·k)	0.1633	0.1621	0.131
Viscosity (kg/m·s)	0.003857	0.003151	0.002662

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	อากาศ	RPO
Volume flow rate (lpm)	40	0.03
Area (m <sup>2</sup> )	0.124	$3.14 \times 10^{-6}$
Velocity (m/s)	0.005	0.15
Mass flow rate (kg/s)	$7.89 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
Combustion eq.	$C_{18}H_{34}O_2 + 25.5(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 18CO_2 + 17H_2O + 95.88N_2$	
Air-fuel ratio (stoich)	12.46	
Air-fuel ratio (actual)	1.97	
Equivalence ratio	6.32	

## 3.2 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยการทดลอง

## 3.2.1 ลักษณะเปลวไฟ

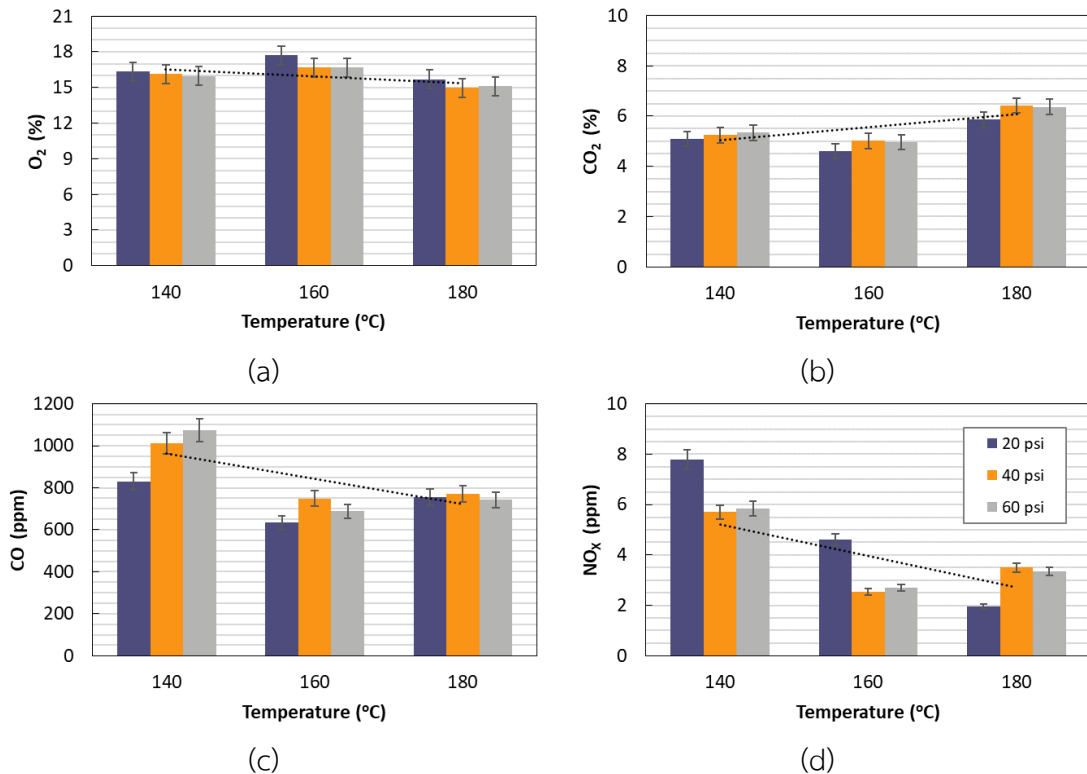


รูปที่ 3.1 ลักษณะของเปลวไฟ

ตารางที่ 3.4 ความยาวเปลวไฟ (cm.)

ความดัน (psi)	อุณหภูมิอุณหภูมิมื้อนเชื้อเพลิง (°C)		
	140	160	180
20	15	33	38
40	25	35	42
60	20	39	52

### 3.2.2 ปริมาณก๊าซไอเสีย



รูปที่ 3.2 ปริมาณก๊าซไอเสียที่วัดได้จากการเผาไหม้ (a) ออกซิเจน, (b) คาร์บอนไดออกไซด์, (c) คาร์บอนมอนอกไซด์, (d) ไนโตรเจนออกไซด์

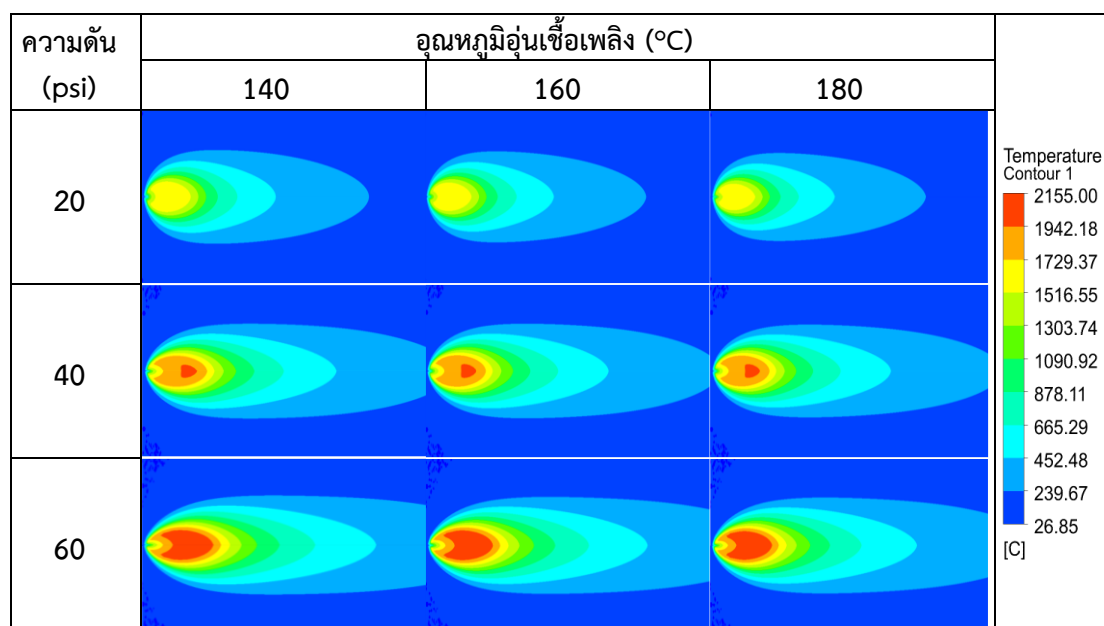
จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิอ่อนเชื้อเพลิง 140 °C ให้เปลวไฟสั้นที่สุด คือ 15 เซนติเมตร เนื่องจากอุณหภูมิเชื้อเพลิงยังไม่เหมาะสม ทำให้ละอองสเปรย์บางส่วนไม่เกิดการเผาไหม้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอ่อนเชื้อเพลิง เปลวไฟจะยาวขึ้นและมียาวที่สุด คือ 52 เซนติเมตรที่อุณหภูมิอ่อนเชื้อเพลิง 180 °C, ความดันอากาศ 60 psi ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงร่วมกับความดันอากาศสูงจะทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิอ่อนเชื้อเพลิงสูงจะส่งผลให้ละอองน้ำมันติดไฟได้ง่ายขึ้น ประกอบกับความดันอากาศที่เพิ่มขึ้น ทำให้เปลวไฟพุ่งได้ไกลและมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ พบว่าปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระหว่างเกิดการเผาไหม้มีการดึงออกซิเจนมาให้มากขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้นั้นคือคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงร่วมกับอากาศความดันสูง ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ดีขึ้น เมื่อการเผาไหม้ดีขึ้น จึงส่งผลให้เกิดก๊าซไอเสียคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.2(a), 3.2(b), 3.2(c) และ 3.2(d) ตามลำดับ

### 3.3 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD)

#### 3.3.1 Temperature contour

จากการศึกษาด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) พบว่าค่าอุณหภูมิเปลวไฟตามความยาวแกนแบบจำลองมีค่าต่ำที่สุด 1661.81 °C ที่อุณหภูมิอุณหภูมิตั้งเดิม 140 °C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอุณหภูมิตั้งเดิมและอุณหภูมิเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด 2154.12 °C ที่อุณหภูมิอุณหภูมิตั้งเดิม 180 °C, ความดันอากาศ 60 psi ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.5 ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลอง



รูปที่ 3.3 Temperature contour

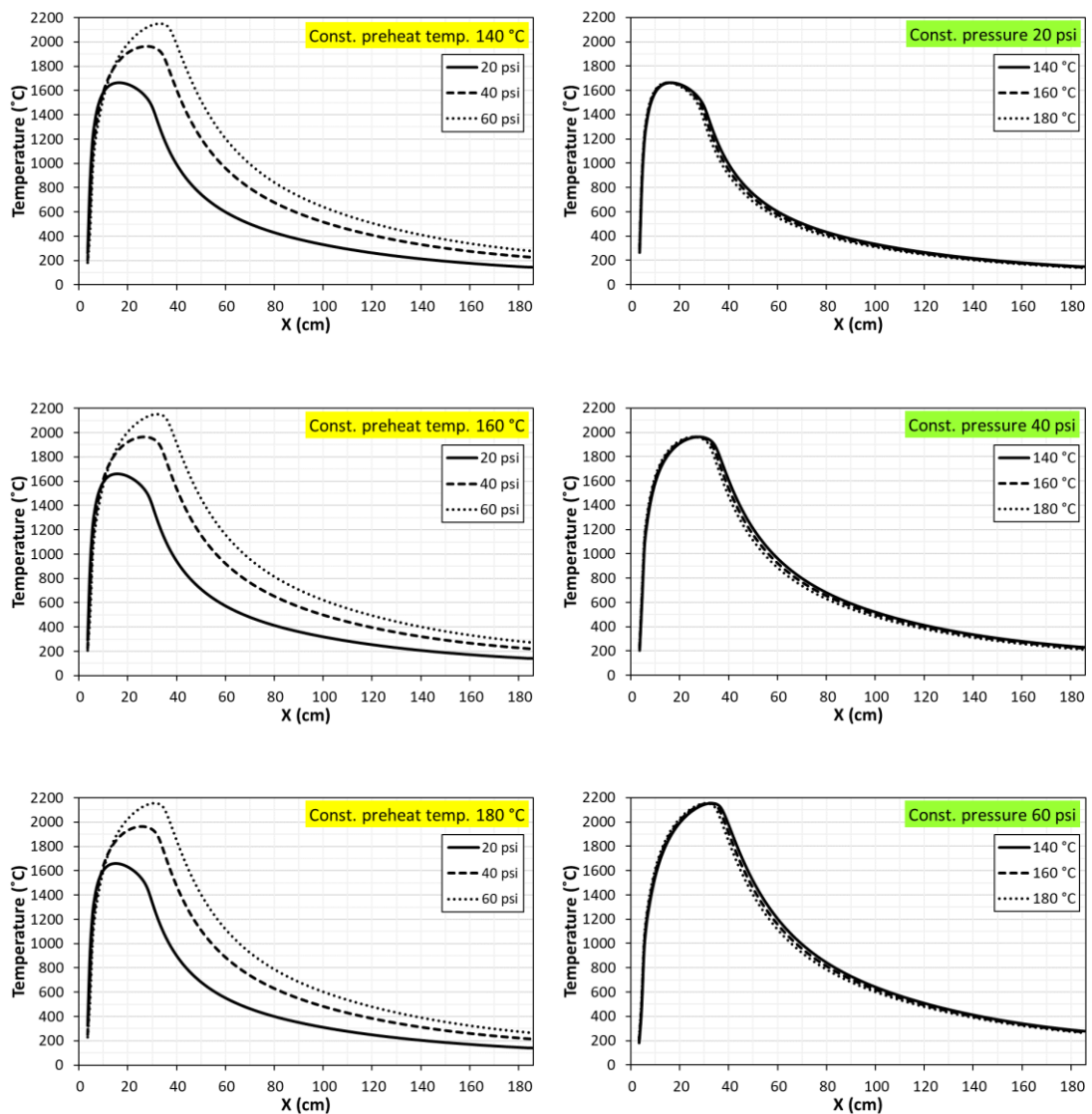
ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดตามความยาวแกนแบบจำลอง (°C)

ความดัน (psi)	อุณหภูมิอุณหภูมิตั้งเดิม (°C)		
	140	160	180
20	1661.81	1662.27	1662.86
40	1963.98	1963.66	1963.42
60	2152.45	2153.21	2154.12



### 3.3.2 อุณหภูมิเปลวไฟ

เมื่อพิจารณาการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุ่นด้วยอุณหภูมิเดียวกัน พบว่าอุณหภูมิเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการเผาไหม้ จากนั้นอุณหภูมิเปลวไฟจึงค่อยๆ ลดลง โดยอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดที่ความดัน 20 psi มีค่าน้อยที่สุดและมีค่ามากที่สุดที่ 60 psi ดังแสดงในรูปที่ 3.4(a) และเมื่อพิจารณาการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ความดันอากาศเดียวกัน พบว่าเชื้อเพลิงที่อุ่นด้วยอุณหภูมิต่างกันให้ค่าอุณหภูมิเปลวไฟต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.4(b)



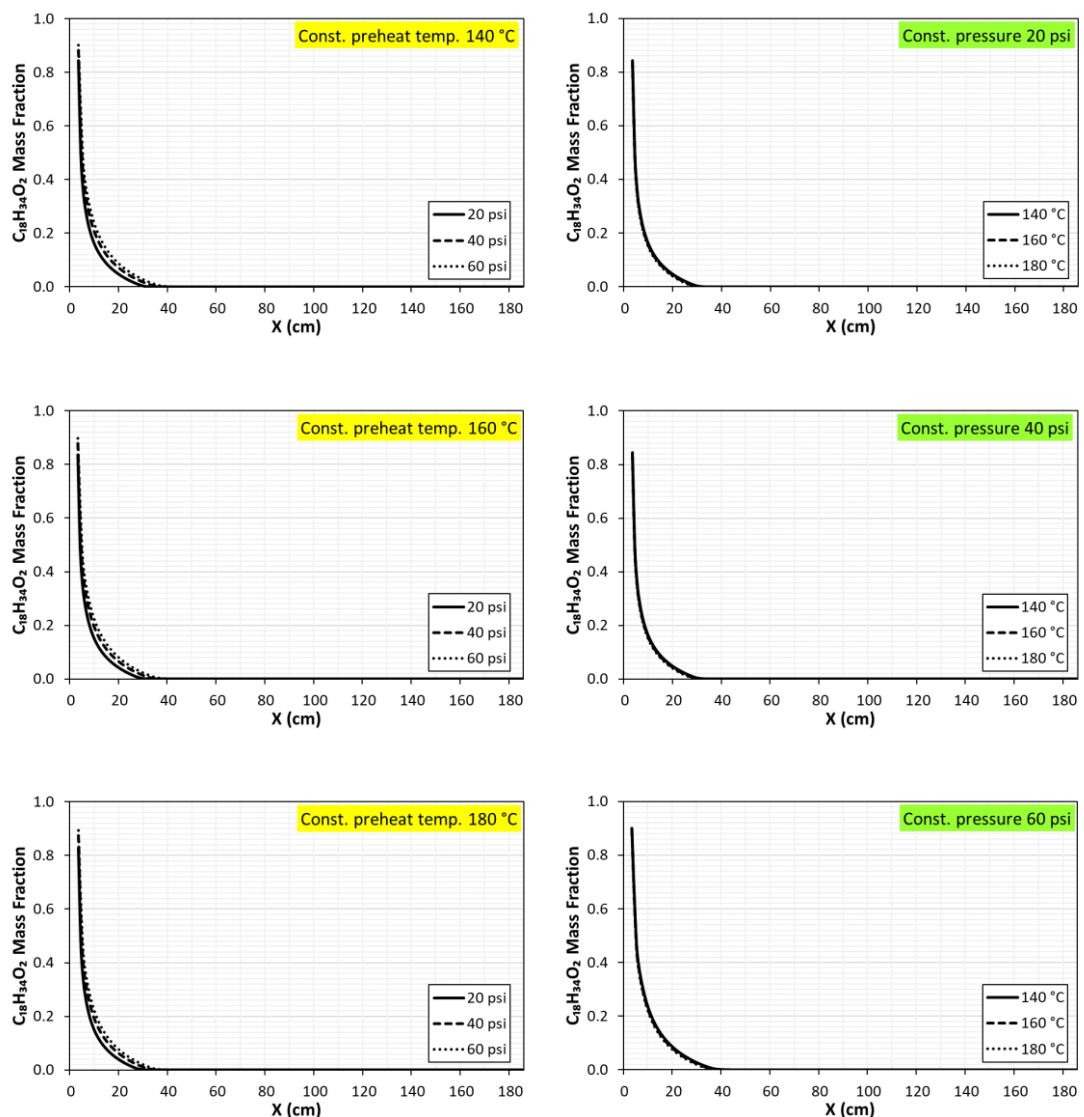
(a)

(b)

รูปที่ 3.4 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดตามความยาวแกนแบบจำลอง (a) กรณีอุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงคงที่, (b) กรณีความดันอากาศคงที่

### 3.3.3 สัดส่วนมวลน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

เมื่อพิจารณาการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าสัดส่วนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะลดลงเร็วกว่าในกรณีความดันอากาศ 20 psi เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีความดันอากาศ 40, 60 psi และเนื่องจากเชื้อเพลิงน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ ดังนั้นสัดส่วนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็น 0 ที่ระยะ 25-35 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5(a) และเมื่อพิจารณาการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ความดันอากาศเดียวกัน พบว่าเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่างกันแสดงค่าสัดส่วนน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.5(b)



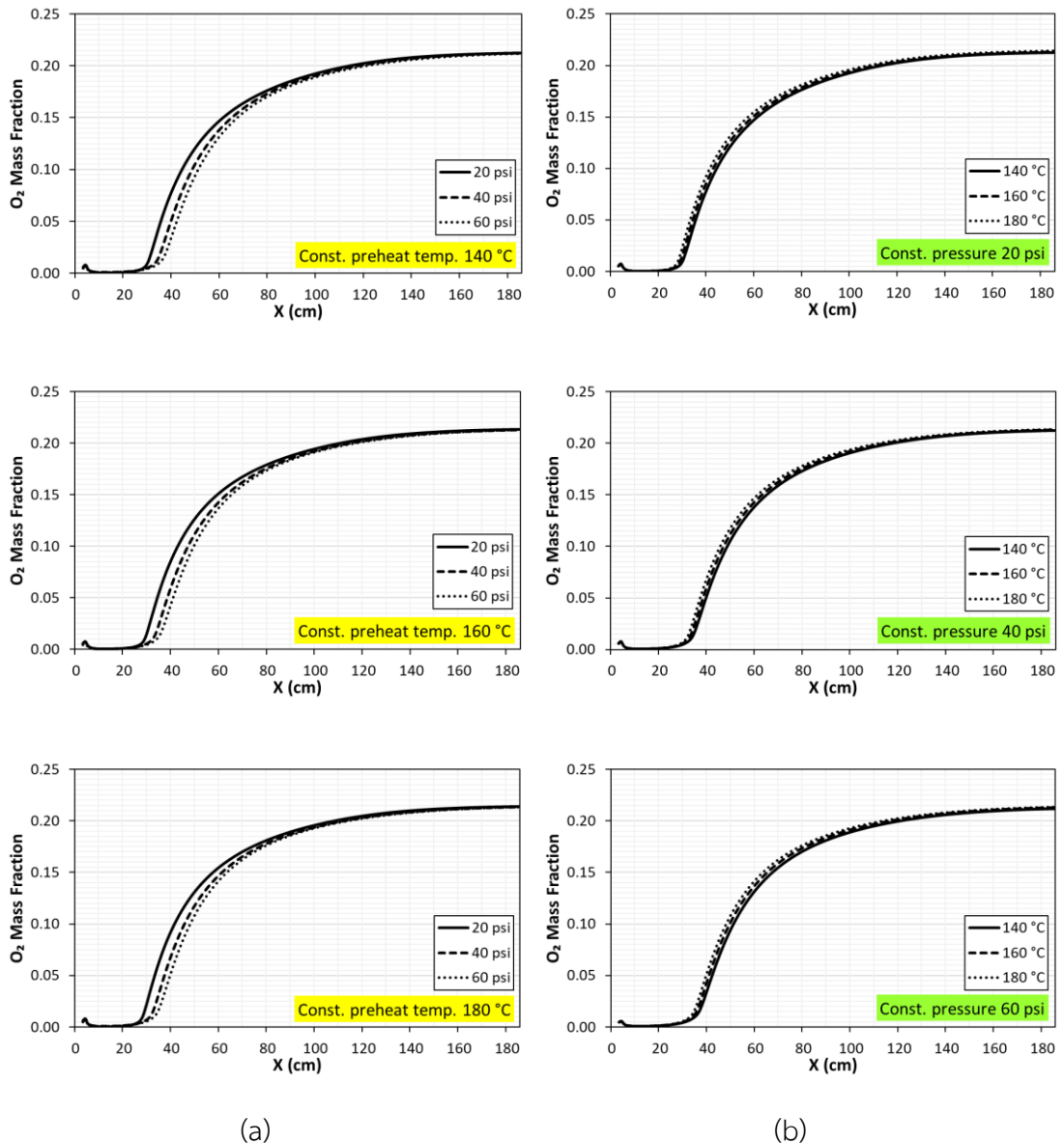
(a)

(b)

รูปที่ 3.5 กราฟแสดงสัดส่วนมวลน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (a) กรณีอุณหภูมิอุณหภูมิเชื้อเพลิงคงที่, (b) กรณีความดันอากาศคงที่

### 3.3.4 สัดส่วนมวลออกซิเจน

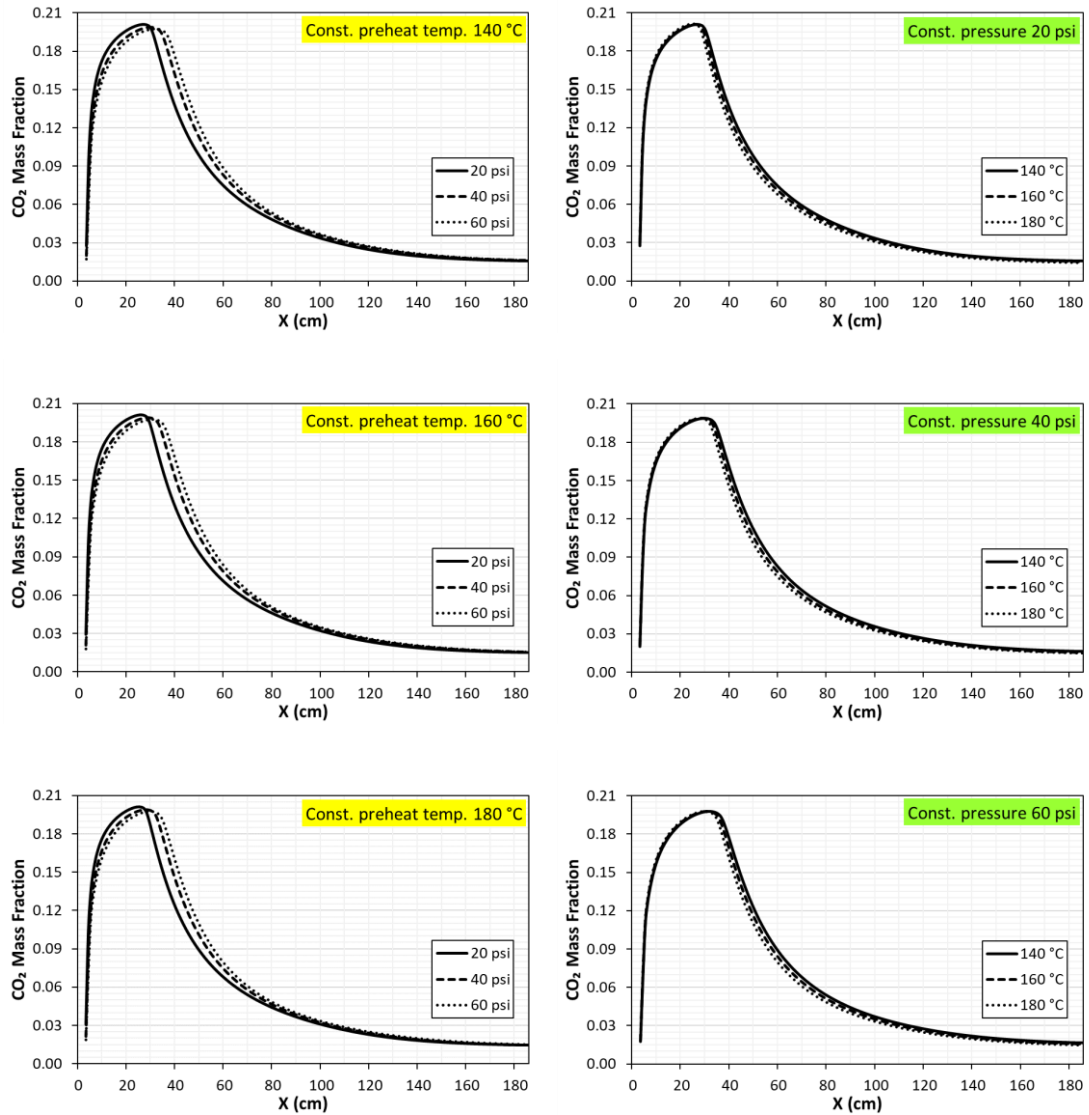
สัดส่วนมวลออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกเมื่ออากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้สัดส่วนมวลออกซิเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้นเช่นเดียวกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะลดลงแล้วเริ่มเพิ่มขึ้นที่ระยะ 25-35 เซนติเมตร เนื่องจากไม่มีน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็น 0 จึงไม่มีสารตั้งต้นเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเผาไหม้ต่อ อากาศที่เข้ามาจึงกลายเป็นอากาศส่วนเกิน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงสัดส่วนมวลออกซิเจน (a) กรณีอุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงคงที่, (b) กรณีความดันอากาศคงที่

### 3.3.5 สัดส่วนมวลคาร์บอนไดออกไซด์

สัดส่วนมวลคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคาร์บอนที่อยู่ในน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นสัดส่วนมวลคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงที่ระยะ 25-35 เซนติเมตร เนื่องจากไม่มีสารตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยาเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



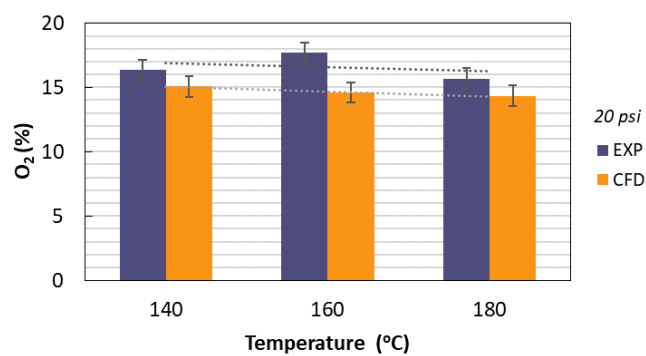
(a)

(b)

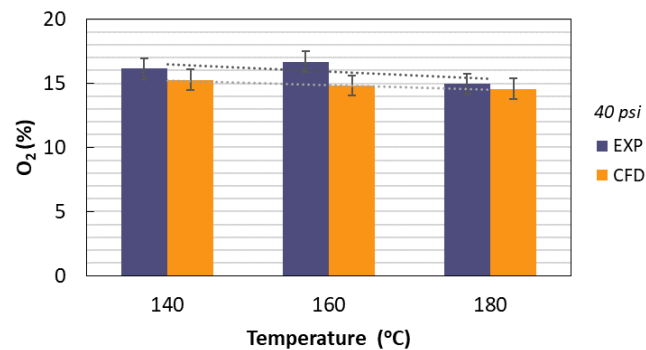
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงสัดส่วนมวลคาร์บอนไดออกไซด์ (a) กรณีอุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงคงที่, (b) กรณีความดันอากาศคงที่

### 3.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาดำเนินการทดลองกับวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD)

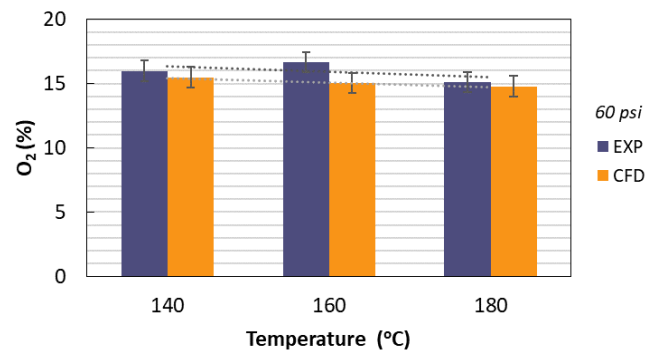
เมื่อวัดปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งถูกปล่อยผ่านปล่องควันเหนือห้องเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย TESTO 350 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเชื้อเพลิงด้วยอุณหภูมิสูง ปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นเนื่องจากมีการใช้ออกซิเจนที่เป็นสารตั้งต้นเพื่อเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินลดลง และเมื่อปริมาณสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เกิดก๊าซผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งผลจากการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9



(a)

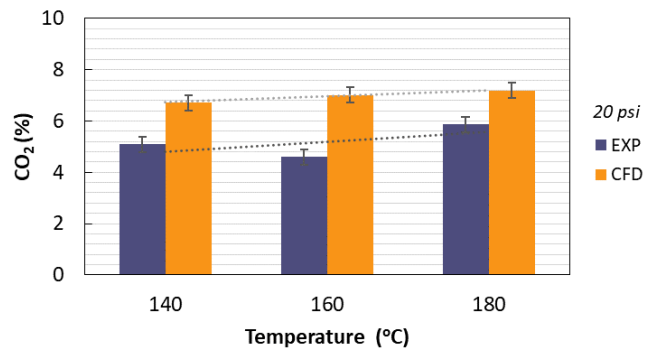


(b)

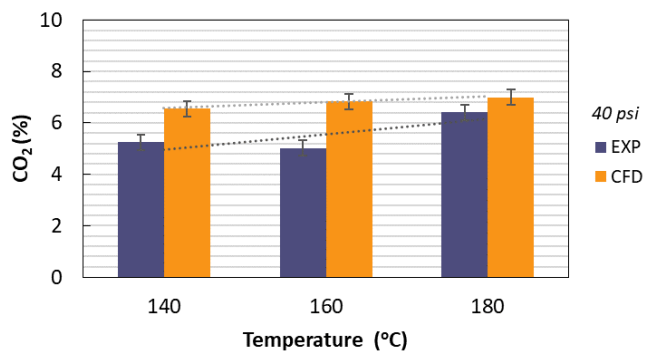


(c)

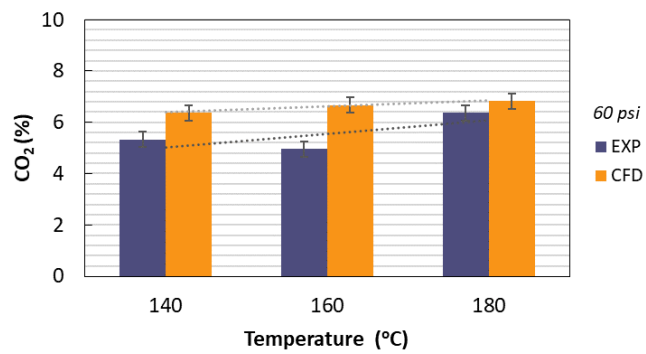
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ความดันอากาศต่างๆ (a) กรณี 20 psi, (b) กรณี 40 psi และ (c) กรณี 60 psi



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันอากาศต่างๆ (a) กรณี 20 psi, (b) กรณี 40 psi และ (c) กรณี 60 psi

## บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา

### 4.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรงสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ พบว่าเมื่ออุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงสูงส่งผลให้ละอองน้ำมันติดไฟได้ง่ายขึ้น

4.1.2 การศึกษาผลของความดันอากาศที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ พบว่าเมื่อความดันอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้เปลวไฟมีระยะพุ่งไกลและมีขนาดใหญ่ขึ้น

4.1.3 เมื่อวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุ่นด้วยอุณหภูมิอุ่นสูงร่วมกับอากาศความดันสูง พบว่าปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ดีขึ้น เมื่อการเผาไหม้ดีขึ้นจึงส่งผลให้เกิดก๊าซไอเสียคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ลดลง

4.1.4 เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาด้วยการทดลองกับวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) พบว่าทั้งสองวิธีให้ผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิง 180 °C, ความดันอากาศ 60 psi เกิดการเผาไหม้ดีที่สุด

### 4.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษากาการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) ควรปรับปรุงการออกแบบห้องเผาไหม้และเงื่อนไขการเผาไหม้ เพื่อจำลองสภาพให้ใกล้เคียงกับชุดทดลองจริงมากขึ้น เช่น การเพิ่มส่วนหัวฉีดเพื่อจำลองการแตกตัวของเชื้อเพลิงและอากาศ, การเพิ่มสมการการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เพื่อศึกษาปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น นอกจากนี้อาจเพิ่มการศึกษาเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในอนาคตต่อไป

## บรรณานุกรม

[1] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม (2563). พลังงานสะอาด พลังงานทางเลือก ทางออกแก้มลพิษและสร้างความมั่นคงทางพลังงาน, [ออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www.deqp.go.th/new/พลังงานสะอาด-พลังงานทางเลือก/>, เข้าดูเมื่อ 13/01/64.

[2] มูลนิธิสัมมาชีพ (2563). พลังงานทางเลือก...พลังงานที่ “ต้องเลือก”, [ออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www.right-livelihoods.org/scoop/พลังงานทางเลือก...พลังงานที่-“ต้องเลือก”/>, เข้าดูเมื่อ 13/01/64.

[3] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี) (2561). ประเภทของพลังงานทดแทน, [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://reo13.mnre.go.th/th/news/detail/9585>, เข้าดูเมื่อ 13/01/64.

[4] Energy absolute. ไปโอดีเซล, [ออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www.energyabsolute.co.th/biodiesel.asp>, เข้าดูเมื่อ 13/01/64.

[5] กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ศักยภาพพลังงานชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน : กรณีศึกษาทะลายเปล่า (Empty Fruit Bunch) , [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2529>, เข้าดูเมื่อ 13/01/64.

[6] ชนินทร พรนภดล, 2550, การวิเคราะห์และออกแบบตู้ปาล์ม, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[7] ผาสุข กุลละวณิชย์, สันต์ชัย กลิ่นพิกุล, สุมณฑา กุลละวณิชย์, สุรเชษฐ์ ชีระมณีและจาตุรงค์ แซ่ลี, 1985, ปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม, สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[8] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. การแปรรูปปาล์มน้ำมัน, [ออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php>, เข้าดูเมื่อ 31/03/64.

[9] อามีน อาลีหมัลบารี, มัคตาร์ แวะหะยีและชยุต นันทดุสิต. การทบทวนเอกสาร: กระบวนการของการสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทย. นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลสารในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 16, 23-24 กุมภาพันธ์ 2560, ศูนย์ฝึกอบรมธนาคารไทยพาณิชย์ จังหวัดเชียงใหม่; 2560.

[10] พูนสุข ประเสริฐสรรพและสุธีระ ประเสริฐสรรพ. การศึกษาและวิเคราะห์สถานภาพและศักยภาพของการใช้ประโยชน์จากของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ. สำนักงานวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม; 2537.

[11] Sivasothy K. (2000), Palm oil milling technology. *Advances in Palm Oil Research*; 1: 745-75.

[12] Alimalbari, A., Hanifarianty, S., Kumar, A., Khompet, T., Eksomtramage, T., Wae-Hayee, M., Development of Mini Pilot Fluidized Bed Gasifier for Industrial Approach: Preliminary Study Based on Continuous Operation, *Journal of Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 55, 2019, pp. 12-19.



[13] McAllister, S., Chen, J.-Y., Fernandez-Pello, A. C., (2011) *Fundamental of Combustion Process*, Springer, ISBN: 978-1-4419-7942-1.

[14] El-Mahallawy, F., Habik, S., (2002) *Fundamentals and Technology of Combustion*, ISBN: 0-08-044108-8.

[15] สำเร็จ จักรใจ, (2547) *การเผาไหม้*, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ISBN: 974-13-2888-5.

[16] Keating, E. L., (2007), *Applied Combustion*, 2nd edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-e: 978-1-4200-1748-9.

[17] Baukul, C. E. (2003), *Industrial burners: Handbook*, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-e: 978-0-203-48880-5.

[18] Ion OPREA, Lucian MIHAESCU, Tudor PRISECARU, Gabriel Paul NEGREANU, Manuela Elena GEORGESCU, Elena POPA, Experiment research on crude vegetable oil combustion in a small boiler – 5.5 kW, *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol. 8, 2009, pp. 475-482.

[19] Nozomu Hashimoto, Hiroyuki Nishida, Masayoshi Kimoto, Kazuki Tainaka, Atsushi Ikeda, Satoshi Umemoto, Effects of Jatropha oil blending with C-heavy oil on soot emissions and heat absorption balance characteristics for boiler combustion, *Renewable Energy*, Vol.126, 2018, pp.924-932.

[20] Abdolsaeid Ganjehkaviri, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Seyed Ehsan Hosseini and Anas Basri Musthafa, Performance Evaluation of Palm Oil-Based Biodiesel Combustion in an Oil Burner, *Energies*, 2016, pp.1-10.

[21] Kang, S. B., Kim, J. J., Im, Y. H., An experimental investigation of a direct burning of crude jatropha oil and pitch in a commercial boiler system, *Renewable energy* 54, 2013, pp.8-12.

[22] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, Ahmed Emara, Combustion Characteristics of a Swirled Burner Fueled With Waste Cooking Oil, *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2015*, November 13-19, 2015.

[23] Ahmed Mahfouz, H.A. Moneib, Ahmed El-fatih, Ashraf F. El-Sherif, H.S. Ayoub, Ahmed Emara, Comparative study among waste cooking oil blends flame spectroscopy as an alternative fuel through using an industrial burner, *Renewable energy*, 2020, pp. 893-907.

[24] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, Ahmed Emara, Comparative study of combustion characteristics and exhaust emissions of waste cooking-diesel oil blends, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, Issue 4, 2018, pp. 3123-3134.

[25] Papasanee Muanruksa, Phavit Wongsirichot, James Winterburn, Pakawadee Kaewkannetra, Integrated Cleaner Biocatalytic Process for Biodiesel Production from Crude Palm Oil Comparing to Refined Palm Oil, *Catalysts* 2021, 11, 734.

[26] NIST. Oleic acid, [ออนไลน์], แหล่งที่มา <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C112801&Mask=8>, เข้าดูเมื่อ 21/03/66.

[27] Chempro Technovation. Palm Oil Properties, [ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.chempro.in/palmoilproperties.htm>, เข้าดูเมื่อ 21/03/66.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

รายละเอียดหัวฉีด W-77 spray gun

## EN W-77 | W-71 Spray Guns \_ PRESSURE | SUCTION | GRAVITY

ANEST IWATA spray gun, has been designed for the application of paints, lacquers and other products that can be atomized by means of compressed air, on all surfaces suitable to receive this type of treatment.

	Before use, adjustment or maintenance, it is important to read this instruction manual very carefully. This manual must be stored in a safe place for any future reference.
	This ANEST IWATA spray guns kit complies to ATEX regulations ATEX 2014/34/EU.
	Protection level: II 2 G X Suitable for using Zones 1 and 2. X marking: Any static electricity discharged from the spray gun is to be diverted to the ground via the conductive air hose as stipulated.

	<b>ALWAYS observe WARNINGS and CAUTIONS in this instruction manual.</b>		
Symbol	WARNING	Hazard level	Consequence
	CAUTION	POTENTIALLY HAZARDOUS SITUATION	Death or serious injury
	IMPORTANT		Minor to moderate injury Property damage

### 1. TECHNICAL SPECIFICATIONS

Models	W-77	W-71
Max. working air pressure:	6.8 bar (98 PSI)	
Weight g (lbs):	803 g (1.77)	673 g (1.49)
Noise level (LAeqT)*:	82.1 dB(A)	74.8 dB(A)
Air Connection:	G1/4" M	G1/4" M
Fluid Connection:	G3/8" M	G1/4" M
Max. Temperature range:	Atmosphere 5 - 40 °C / Air-Fluid 5 - 43 °C	

\* Measuring point: 1m backwards from gun, 1.6 m height.

#### 1.1 TECHNICAL DATA

MODELS							
Model	Operation	bar	No.	bar	ml/min	Nb/min	mm
W-77 0	PRESSURE	1.2	0	3.5	480	430	445
W-77 1S		1.5	1		255	185	210
W-77 2S	SUCTION	2.0	2		345	250	255
W-77 3S		2.5	3		435	325	280
W-77 1G		1.5	1		285	185	230
W-77 2G	GRAVITY	2.0	2	390	250	290	
W-77 3G		2.5	3	485	325	330	
W-71 0	PRESSURE	0.8	0	3.5	200	240	190
W-71 1S		1.0	1S	3.0	95	75	100
W-71 2S		1.3	2S		135	85	135
W-71 3S	SUCTION	1.5	3S		180	165	170
W-71 4S		1.8	4S		195	230	200
W-71 21S		1.3	21S		140	195	155
W-71 31S		1.5	31S		170	230	170
W-71 1G		1.0	1G		110	75	120
W-71 2G		1.3	2G		155	85	155
W-71 3G	GRAVITY	1.5	3G		210	165	185
W-71 4G		1.8	4G		220	230	230
W-71 21G		1.3	21G	160	195	165	
W-71 31G		1.5	31G	190	230	185	

### 2. SAFETY WARNING

<b>FIRE AND EXPLOSION</b>	
Never use the following HALOGENATED HYDROCARBON SOLVENTS: which can cause cracks or dissolution of gun body (aluminium) due to chemical reaction. UNSUITABLE SOLVENTS: methyl chloride, dichloromethane, 1,2-dichloroethane, carbon tetrachloride, trichloroethylene, 1,1,1-trichloroethane	

Sparks and open flames are strictly prohibited. Paints can be highly flammable and can cause fire. Do not expose to open flames, electrical goods, cigarettes etc.

Securely ground spray gun using conductive air hose. (<1MΩ). Always ensure that the spray gun is earthed correctly.

#### PROTECTION OF HUMAN BODY



Use in a well-ventilated site, using a spray booth. Poor ventilation can cause organic solvent poisoning and fire.

Always wear protective gear (safety glasses, mask, gloves) to avoid inflammation of eyes and skin. In case of any physical discomfort, immediately seek medical advice.

Wear earplugs if necessary. Noise level can exceed 85 dB(A), depending on operating conditions and painting site.

Pulling the trigger many times during operation, may cause carpal tunnel syndrome. Always rest, in case of tiredness.

#### IMPROPER USE

Never point gun towards people or animals.



Never exceed maximum working pressure or maximum operating Temperature

Always release air and fluid pressure before cleaning, disassembling or servicing. Otherwise, remaining pressure can cause bodily injury due to improper operation or scattering of cleaning liquid.

Tip of fluid needle set has a sharp point.

Do not touch the tip during maintenance to avoid accidents.

Never use this gun to spray foods or chemicals. Otherwise, foreign substance, could cause corrosion of fluid passages which could adversely affect health.

Never alter this spray gun, to avoid insufficient performance and damage.

If something goes wrong, immediately stop operation and find the cause. Do not use again, until you have solved the problem.

Do not enter working areas, where robots, reciprocators, etc. are used, until they have been turned off. Otherwise, they could cause injury.

### 3. HOW TO CONNECT

#### CAUTION



Use clean air filtered through air dryer and air filter.

When using this gun for the first time after purchase, adjust fluid needle packing set, spray cleaner to clean fluid passages and remove rust preventive oil.

Firmly fix the paint supply hose or a suitable container to spray gun, to avoid that disconnection of it, can cause bodily injury.

- Firmly connect air supply hose to air nipple G1/4"(13).
- Firmly connect paint supply hose or suction cup to fluid nipple G 3/8"(W-77) and G 1/4"(W-71).
- Flush fluid passages with a compatible cleaner.
- Pour paint into container, test spray, adjust fluid output and pattern width.

### 4. HOW TO OPERATE

Suggested atomizing air pressure varies according to each model, and it is listed in the Specifications Table. (see left)

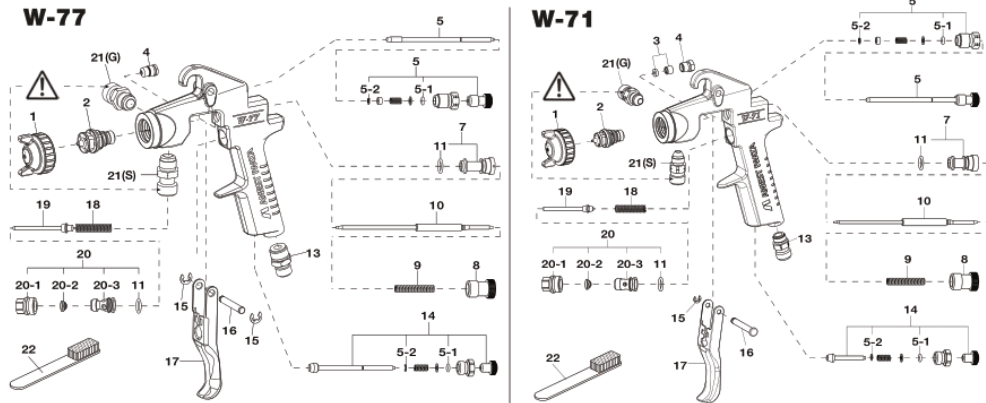
Recommended paint viscosity differs according to paint property and painting conditions.

Set the spray distance from the gun to the work piece, as near as possible within the range of:  
200-250 mm (8-10 in) (W-77) and 150-200 mm (5.9-7.9 in) (W-71)

The gun should be held so that it is perpendicular to the surface of the work-piece at all times. Then, the gun should move in a straight and horizontal line. Arcing the gun causes uneven painting.

**EN W-77 | W-71 Spray Guns \_ PRESSURE | SUCTION | GRAVITY**

**7. SPARE PARTS LIST**



Ref.	Code	Description	
<b>W-77</b>			
1	93901911	AIR CAP SET	ø 1,2
	93900901	AIR CAP SET (G/S)	ø 1,5
	93901901	AIR CAP SET (G/S)	ø 2,0
	93900911	AIR CAP SET (G/S)	ø 2,5
2+10	93938900	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 1,2
	93007720	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 1,5
	93007760	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 2,0
	93997020	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 2,5
<b>W-71</b>			
1	93900020	AIR CAP SET	ø 0,8
	93900030	AIR CAP SET (1S-1G)	ø 1,0
	93901020	AIR CAP SET (2S-2G)	ø 1,3
	93900090	AIR CAP SET (21S-21G)	ø 1,3
	93900080	AIR CAP SET (3S-3G)	ø 1,5
	93900100	AIR CAP SET (31S-31G)	ø 1,5
93901100	AIR CAP SET (4S-4G)	ø 1,8	
2+10	93938081	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 0,8
	03006060	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 1,0
	93999920	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 1,3
	03006120	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 1,5
	03006070	FLUID NOZZLE + FLUID NEEDLE	ø 1,8

Ref.	W-77	W-71	Description	
3	---	03906110	NEEDLE PACKING SET	●
4	93545660	03067082	NEEDLE PACKING CARTRIDGE	●
5	03909900	93909080S	PATTERN ADJUSTMENT SET	
5-1	03906100	03906100	'O' RING SET	●
5-2	06610023	06610023	STOPPER	●
7	03064082	03064082	FLUID NEEDLE GUIDE	
8	03102081	03102081	FLUID ADJ. KNOB	
9	03069081	03069081	FLUID NEEDLE SPRING	
11	03906100	03906100	'O' RING SET	●
13	93160002	03010080	AIR NIPPLE	
14	03907900	93907081S	AIR ADJUSTMENT SET	
15	03842240	03912030	STOPPER	●
16	03167041	03167080	TRIGGER STUD	
17	03162900	03162080	TRIGGER	
18	03088050	93088082S	AIR VALVE SPRING	
19	03081900	93081081S	AIR VALVE	●
20	03930900	93930090S	AIR VALVE SEAT SET	
20-1	03086082	03086082	AIR VALVE PACKING SEAT	
20-2	03909101	03909101	AIR VALVE PACKING SET	
20-3	03083901	03083082	AIR VALVE SEAT	
21	03161901	03161082	FLUID NIPPLE	
22	---	W2COM6163	BRUSH	

**FLUID NOZZLE FLUID NEEDLE SET COMBINATION**

MODELS	Fluid Nozzle		Fluid Needle set
	Orifice mm (inch)	Mark	Mark
W-77	1.2 (0.047)	0	0
	1.5 (0.059)	1	1
	2.0 (0.079)	2	2
	2.5 (0.098)	3	3
W-71	0.8 (0.031)	0N	0
	1.0 (0.039)	1N	1
	1.3 (0.051)	2N	2
	1.5 (0.059)	3N	3
	1.8 (0.071)	4N	4

**⚠ NEVER REMOVE FLUID NIPPLE FROM GUN BODY!** Any malfunctions resulting by the removal of the following parts will not be covered by the Warranty. In case of replacement contact your Technical Service directly.

**⚠** When ordering parts, specify gun model, part name with No. and marked No. of air cap set, fluid nozzle and fluid needle.

● **Marked parts are wearable parts.**

**ภาคผนวก ข**

Nilnet Jankaew, Maizirwan Mel and Makatar Wae-hayee, **A Potential Study of Crude Palm Oil Used as Fuel for Direct Combustion**, The 4th World Virtual Conference on Applied Sciences and Engineering Applications In conjunction with the 6th International Symposium on Fluid Mechanics and Thermal, 27th - 28th March 2021, Online conference.



## A Potential Study of Crude Palm Oil Used as Fuel for Direct Combustion

Open  
Access

Nilnet Jankaew<sup>1</sup>, Maizirwan Mel<sup>2</sup>, Makatar Wae-hayee<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkla, Thailand

<sup>2</sup> Department of Biotechnology Engineering, Faculty of Engineering, International Islamic University, Malaysia

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article history:

Vegetable oil applying as a fuel for direct combustion is an interesting alternative energy development which is not only an energy development but also increasing plantation production prices for helping palm farmers. In this article, using palm oil and other vegetable oils as fuel for direct combustion, such as using in industrial boilers or in industrial cooking processes, was reviewed. Firstly, properties of vegetable oils and its blend with fuel oil, diesel oil were presented. Then, the study of using vegetable oils as fuel for direct combustion: flame characteristic, radiation, combustion efficiency, emissions and experiment set up, was reported. Finally, the case studies of power plants which applied CPO blend as fuel in co-firing process were also presented.

#### Keywords:

Fuel, Crude palm oil, Direct combustion, Combustion efficiency

Copyright © 2020 PENERBIT AKADEMIA BARU - All rights reserved

### 1. Introduction

Since the Industrial revolution, the energy mix of most countries across the world has become dominated by fossil fuels. 75% of global greenhouse gas emissions result from the burning of fossil fuels that are responsible for large amounts of air pollution and a health problem which leads to at least 5 million deaths each year. To reduce CO<sub>2</sub> emissions and air pollution, the world needs to rapidly shift towards low-carbon sources of energy – renewable energy [1-4].

Biomass energy, one of renewable energy, has played a significant role because it offers environmental and social benefits. Moreover, it can be converted into electricity and heat by the most common technique which is called direct combustion [5-7] and become a vital part of the global energy mix and account for an ever-growing share of electric capacity added worldwide [8].

Considering in Southeast Asia, crude palm oil (CPO) production is estimated at 72.26 million ton in 2019. Indonesia is expected to produce the biggest share at 40.50 million, followed by Malaysia at 20.50 million. The two countries account for 84.4% of global production. Thailand ranks third, producing 2.90 million ton a year or 4% of global output [9].

\* Corresponding author.

E-mail address: [wmakatar@eng.psu.ac.th](mailto:wmakatar@eng.psu.ac.th) (Makatar Wae-hayee)

<https://doi.org/XX.XXXXX/arnht.XX.XX.XXX>



According to the US Department of Agriculture data (USDA, 2020), in average, the palm oil harvested areas in Southeast Asia have grown a lot and led to a huge increase in palm oil production in the year 2018-2019 [10]. Due to the oversupply of palm oil, the market price of crude palm oil (CPO) went to a historic low. The governments try to lift the price up by using policies such as biodiesel and fuel in co-firing process [11].

Producing biodiesel from palm oil requires a great amount of materials and energy. During the production process, several kinds of emissions are released and affect the environment [12]. Therefore, using crude palm oil as fuel for direct combustion such as in boiler [13, 14] or industrial cooking process is another interesting development. It is not only to decrease emissions but also a way to help palm farmers.

This study focuses on using crude palm oil as fuel for direct combustion. The aims of this article are to review and collect related information about using palm oil and other vegetable oils in direct combustion.

## 2. Properties of fuels

Properties of Fuel oil (FO), Crude palm oil (CPO), Rapeseed oil, Sunflower oil, Crude jatropha oil (CJO), Jatropha biodiesel, Conventional diesel and C-heavy oil are presented in table 1. According to a study of *Electricity Generating Authority of Thailand* [15] shows that viscosity of fuel oil (FO) is higher than crude palm oil (CPO). However, gross heat of combustion does not differ that much, and CPO also gives lower carbon residual which causes lower smoke and carbon.

**Table 1**  
Properties of Fuel oil (FO), Crude palm oil (CPO), Rapeseed oil, Sunflower oil, Crude jatropha oil (CJO), Jatropha biodiesel, Conventional diesel and C-heavy oil

Properties	Unit	Types of fuel									
		FO	CPO	CPO	Sunflower	Lower fuel oil	CJO	Jatropha biodiesel	Conventional diesel	C-heavy oil	CJO
Viscosity	(Cst.)	[15]	[15]	[16]	[17]	[17]	[18]	[18]	[18]	[19]	[19]
	(°E)	170.3	28.2		2.81	1.4					
	(mm <sup>2</sup> /s)			38.1			35.4	4.59	4.84	110.0	25.8
Density	(kg/dm <sup>3</sup> )				0.918	0.9					
	(g/cm <sup>3</sup> )									0.9635	0.9097
	(g/ml)						0.94	0.88	0.83		
Flash point	(°C)	71	160				226	182	71	93	248
Fire point	(°C)						236	190	76		
Ignition point	(°C)				313	50				408	417
Pour point	(°C)	-9	2								
Gross heat	(cal/g)	10,166	9,412								
Calorific value	(MJ/kg)				39.37	40.6	39.76	45.2	46.22		
HHV	(J/g)			40800						42,820	39,670
LHV	(J/g)									40,450	37,026
Carbon residual	(%wt)	11.2	0.41	0.279	0.294	1.0				21.7	

A study of *Opera et al.* [17], for sunflower oil, higher ignition point could be more difficult to ignite, but due to higher viscosity, better atomization and efficient burning for both vegetable oils compared to low fuel oil.

A study of *Suardi et al.* [18] shows that crude jatropha oil (CJO) and Jatropha biodiesel give higher flash point and fire point but lower carbon residual than diesel oil. It means that is more difficult to ignite but less emission as shown in table 1.

### 3. Related investigation

*Oprea et al.* [17] studied experimental combustion of crude vegetable oil combustion in 55 kW small boiler. The combustion experiments, sunflower crude oil versus low fuel oil were compared. Both fuels were preheated at a temperature of about 70-80 °C. A burner was equipped with an atomizing nozzle with a diameter of 1.5 mm, and the atomizing pressure was in the range of 1.35-1.4 MPa. The result shows that the flame temperature of crude sunflower oil was about 2,000 °C without smoke or carbon black. Combustion efficiency and NO<sub>x</sub> emission were similar to low fuel oil, but the CO emission of sunflower oil was higher than fuel oil.

*Suardi et al.* [18] did an experimental study of the ignition process and combustion of biodiesel-water-air rapid mixing derived from waste cooking oil, crude palm oil and jatropha oil in burner combustion. Experiment set up is shown in Fig. 1. Experiment parameters were water content of 0, 5, 10, 15% and equivalent ratio of 0.6, 1, 1.4. The study found that high water content in the mixtures resulted in smaller spray angle and longer penetration length that will produce the larger combustion area. A higher equivalent ratio will produce larger flame area.

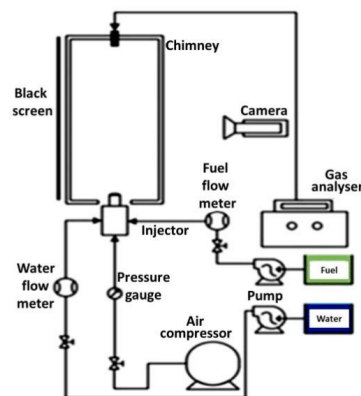


Fig. 1. Experiment set up of *Suardi et al.* [18]

*Hashimoto et al.* [19] studied the combustion characteristics compared 100% C-heavy oil with 50% C-heavy oil/crude jatropha oil (CJO) blending. Experimental set up is shown in Fig. 2, and properties of fuel are shown in table 1. The result shows that the flame radiation intensity of C-heavy oil/CJO blending is lower than that of 100% C-heavy oil. The NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions using CJO blended with C-heavy oil were greatly decreased because the nitrogen and sulfur contents in CJO were significantly lower than that of C-heavy oil.

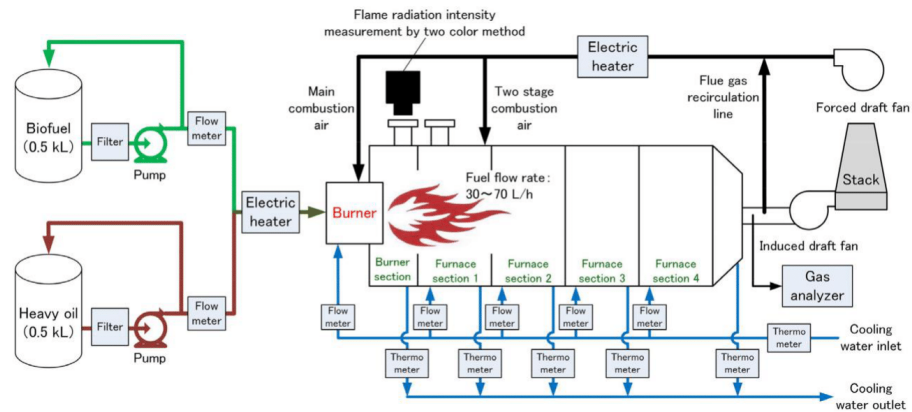


Fig. 2. Experiment set up of Hashimoto et al. [19]

Kang et al. [20] studied an experimental investigation focused on preheating temperature in the range of 50-100 °C of crude Jatropha oil (CJO) and pitch. The study focused on burning condition stability in a commercial boiler system. The result shows that the preheating temperature of stable combustion of crude Jatropha oil is 90-100 °C.

Ganjehkaviri et al. [21] studied combustion characteristics of biodiesel-diesel blending: 10:90 (B10), 20:80 (B20), 40:90 (B40), Conventional diesel fuel (CDF) and Palm methyl ester oil (PME) in oil burner as shown in Fig. 3. Combustion wall temperature and exhaust gas were measured. The study found that at ER=1, the wall temperature decreases when the percentage volume of palm oil-based biodiesel increases. CDF has the highest wall temperature and PME has the lowest wall temperature as shown in Fig. 4. Moreover, NO<sub>x</sub> and CO in exhaust gas also decrease when the percentage volume of palm oil-based biodiesel increases.

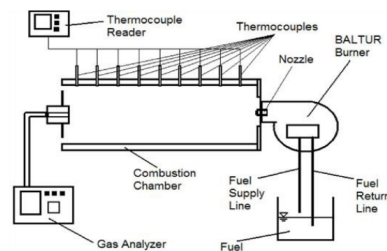


Fig. 3. Experiment set up of Ganjehkaviri et al. [21]

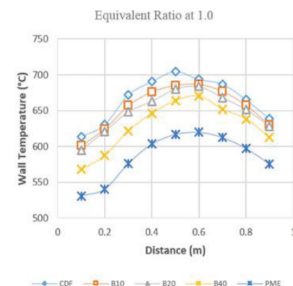


Fig. 4. The wall temperature [21]

Mahfouz et al. [22] studied the effect of waste cooking - diesel oils blends: 0, 20, 40, 60, 80 and 100% on performance, emissions and combustion characteristics of industrial oil burner. It was found that NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and CO decrease when percentage volume of waste cooking oil increases.

Tashtoush et al. [23] studied combustion performance and emissions of ethyl ester of a waste vegetable oil in a water-cooled furnace as shown in Fig. 5. It was found that biodiesel oil produces less NO<sub>x</sub> and CO emissions and higher combustion efficiency than the case of diesel oil.

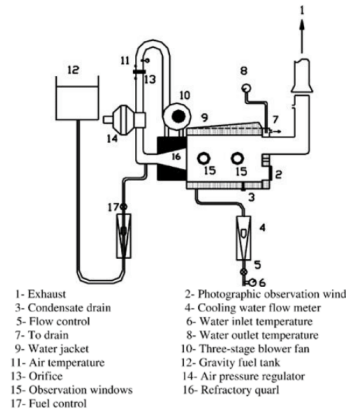


Fig. 5. Experiment set up of *Tashtoush et al.*[23]

*Lapirattanakun and Charoensuk* [24] designed cooking stove using Wasted Vegetable Oil (WVO) as fuel as shown in Fig. 6. The development of the stove was to accelerate vaporization of WVO by using steam generated from heat released from LPG burner to control temperature and adding porous ceramic media having 2-cm diameter for stabilizing flame as shown in Fig.7. The study found that this WVO burner was suitable to be operated within the range of nominal firing rate at 325–548 kW/m<sup>2</sup> and water flow rate at 0.16 kg/min.

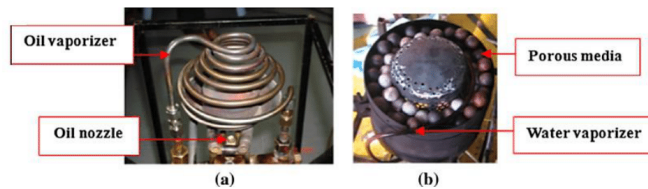


Fig. 6. (a) Previous version without porous media, (b) current burner with porous media [24]

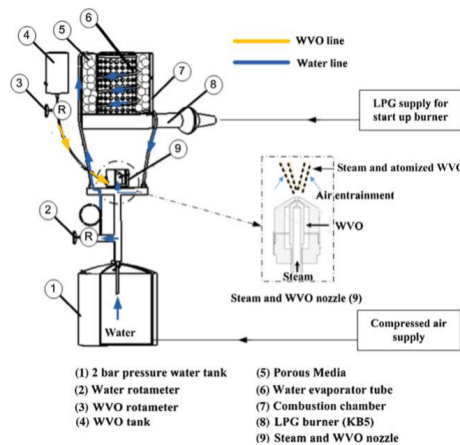


Fig. 7. Experiment set up of *Lapirattanakun and Charoensuk* [24]

Muhammad *et al.* [25] studied performance of sludge palm oil (SPO) combustion using waste oil burner compared to diesel. The study found that free fatty acid (FFA) containing in SPO was about 30 % calculated from Eq. (1)

$$\text{FFA, \%} = \frac{2.56 \times M \times V}{m_s} \quad (1)$$

Where; M = molarity of NaOH (M)  
V = volume of titrated NaOH (ml)  
 $m_s$  = mass of SPO sample (g)

SPO density and viscosity is  $0.982 \text{ g/cm}^3$  and  $67.76 \text{ mm}^2/\text{s}$  respectively, which are higher than diesel. Lower  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emission during combustion compare to diesel around 34 %, 6% and 90 % reduction respectively.

Li *et al.* [26] studied on the effect of the pulverized coal concentration on lean-coal combustion in a lateral-ignition tiny-oil burner by mixing coal with oil that ignited by the high-energy igniter. The result shows that as the coal concentration increased 0, 0.27, 0.44, 0.62 and 0.80 respectively, releasing rates for C and H decreased gradually.  $\text{O}_2$  concentration at the exit of burner was 0.41-3.64 %, and the burner resistance decreased from 2,200 to 1,400 Pa.

Mahfouz *et al.* [27] studied combustion characteristics and exhaust emissions of waste cooking-diesel oil blends as shown in Fig. 8. Blending ratio of waste cooking oil to diesel oil is varied at 0, 20, 40, 60, 80 and 100%. The equivalence ratio is varied from 0.6 to 1.05. The study found that the higher blending ratio, the lower exhaust gas temperature and combustion efficiency decreased as shown in Fig.9, and emissions,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  also decreased as shown in Fig. 10. They suggested that the blending ratio should not exceed 20% to ensure acceptable combustor efficiency and lower emissions.

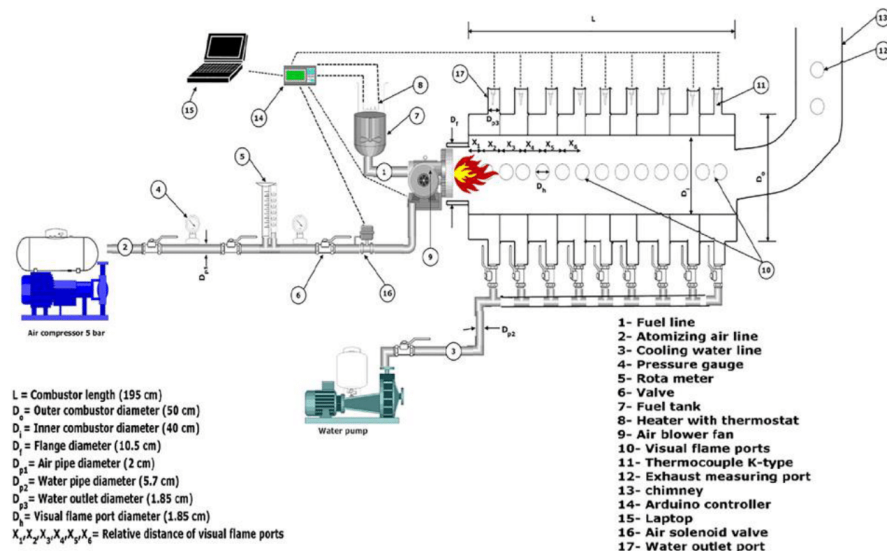


Fig. 8. Experiment set up of Mahfouz *et al.*[27]

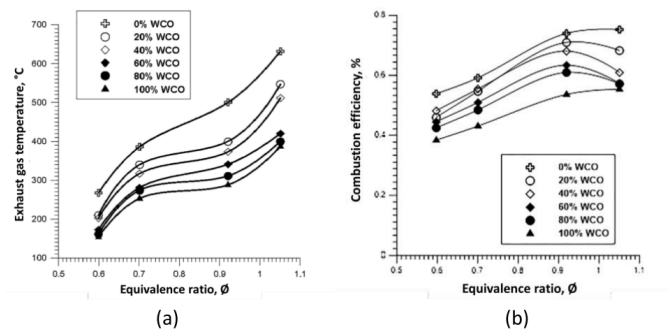


Fig. 9. (a) Exhaust gas temperature, (b) Combustion efficiency [27]

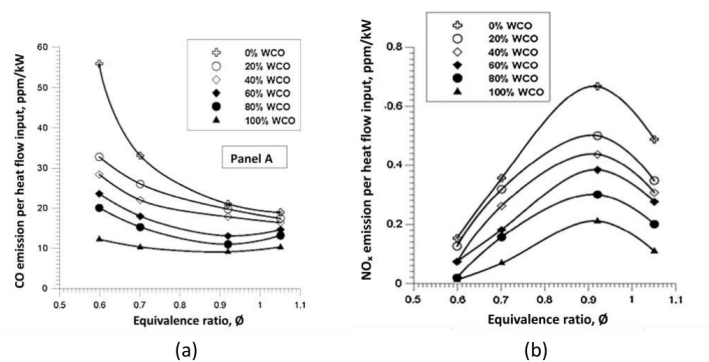


Fig. 10. (a) CO emission, (b) NO<sub>x</sub> emission [27]

*Mahfouz et al.* [28] studied a combustion of heavy diesel oil (HDO), light diesel oil (LDO), waste cooking oil (WCO), B1 (LCO blending with 20% WCO) and B2 (HCO blending with 20% WCO). An industrial burner with hyperspectral camera is used to measure flame characteristics as shown in Fig. 13. The study covers four equivalent ratios of 0.63, 0.75, 0.96 and 1.1. It was found that combustion efficiency of HDO, LDO and B1 were 63, 60 and 60% at equivalent ratio 0.85 respectively as shown in Fig. 14. The decreasing of combustion efficiency was due to radiation property. When analyzed contour map of fuel temperature, the result shows that the blended fuel (B2) shows a longer reaction zone than that of HDO fuel due to the larger percentage of oxygen. Due to the comparatively lower heating value of LDO and B1 to that for HDO and B2, the fuel droplets got comparatively finer, exhibit fast evaporation and mixing; resulting in shorter flame as shown in Fig. 15. They also recommended that WCO is not suitable to apply solely as it suffers from poor atomization, vaporization, bad mixing, and lower heating value.



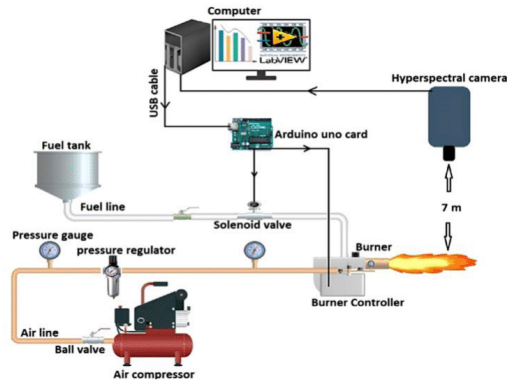


Fig. 13. Experiment set up of Mahfouz et al. [28]

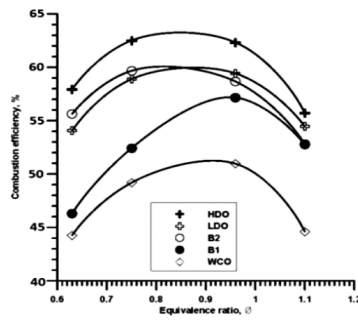


Fig. 14. Combustion efficiency [28]

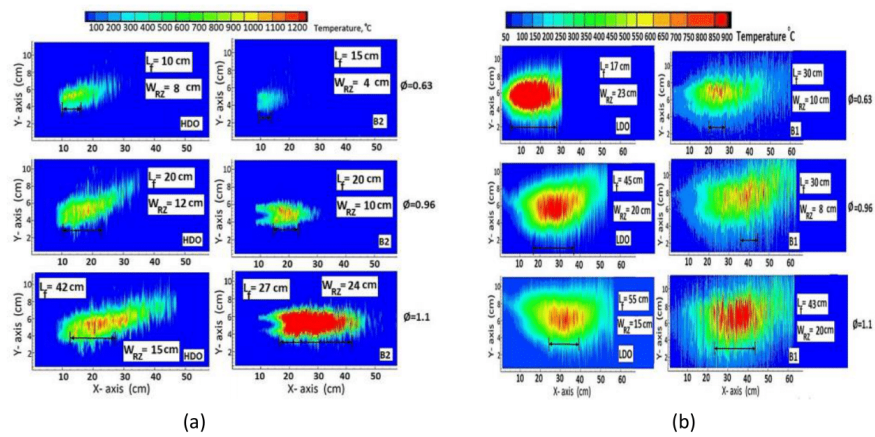


Fig. 15. Contour maps of the cross-sectional spatial average inflame [28]  
 (a) Temperatures for HDO and B2, (b) Temperatures for LDO and B1

*Mahfouz et al.* [29] studied combustion characteristics of a swirled burner fueled with waste cooking oil (WCO) compared with light diesel oil (LCO) as shown in Fig. 11. WCO and LCO were preheated at 90 °C and 80 °C respectively before entering the burner to decrease viscosity. Different primary air pressures were varied at 0.5, 1, 1.5 and 2 bar. The result shows that CO and NO<sub>x</sub> emissions for WCO are lower than LCO, and the concentration of O<sub>2</sub> was more for WCO leading to be better combustion efficiency. Because of higher density and viscosity, flame characteristics of WCO tended to have a smaller width and longer penetration.

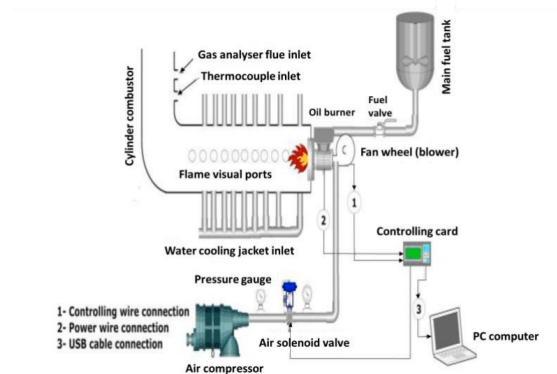
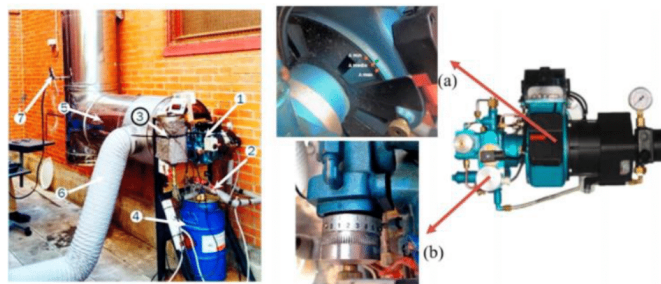


Fig. 11. Experiment set up of *Mahfouz et al.* [29]

*San Jose et al.* [30] studied spray characteristics, combustion performance and palm oil emissions in a low-pressure auxiliary air fluid pulverization burner as shown in Fig. 12. Fuel flow rates evaluated were 4.1, 6.1 and 7.3 kg/h and air flow rates were 29.90, 41.10 and 45.11 kg/h. The study found that the greater spray cone angle resulting in the penetration length was shorter. The lowest emissions occur at penetration length less than 44.3 cm and a cone angle being larger than 27.1°. Combustion efficiency, CO and C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> were improved when fuel flow in the burner increased and air flow decreased.



Photograph of the experimental facility. 1, Burner; 2, valve system; 3, oil tank; 4, diesel fuel tank; 5, combustion chamber; 6, refrigeration air; 7, fume analyzer. (a) Secondary air adjustment; (b) fuel flow adjustment.

Fig. 12. Experiment set up of *San Jose et al.* [30]



According to related investigation, research summary of vegetable oil applied as fuel for direct combustion are shown in table 2. Most of investigations focused on emissions, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>. The results show that vegetable oil released less emissions compared to other oil, and blending fuel was less in emissions as well. Some also studied about flame characteristics. The results show that blending fuel has an effect on longer penetration and lower flame radiation intensity. In addition, some studied about other parameters such as burner design, Free Fatty Acid, coal, spray cone angle that can affect the combustion reaction.

**Table 2**  
Research summary of vegetable oil applied as fuel for direct combustion.

Types of fuel	Blending ratio, BR (%) ER ( - ) Pressure, P (mPa) Preheat temp., T ( °C)	Flame characteristic	Emission	Reference
- Sunflower crude oil	P = 1.35-1.4 mPa T = 70-80 °C	Color: Yellow Temperature: 2,000 °C	No smoke and carbon black	<i>Oprea et al.</i> [7]
- Crude palm oil - Crude jatropa oil	BR = 0, 5, 10, 15% ER = 0.6, 1, 1.4	Higher water content, longer penetration length		<i>Suardi et al.</i> [8]
Blending of - C-heavy oil - Crude jatropa oil - Crude jatropa oil	BR = 50% T = 90-100 °C	Flame radiation intensity in blending is lower than in 100% C-heavy oil	NO <sub>x</sub> and SO <sub>2</sub> decrease	<i>Hashimoto et al.</i> [9] <i>Kang et al.</i> [10]
Blending of - Bio diesel - Diesel	BR = 10:90(B10), 20:80(B20), 40:90 (B40) ER = 1		Higher percentage volume of palm oil-based biodiesel, less NO <sub>x</sub> and CO	<i>Ganjehkaviri et al.</i> [11]
Blending of - Waste cooking oil - Diesel oil	BR = 0, 20, 40, 60, 80, 100%		Higher percentage volume of waste cooking oil, less NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> and CO	<i>Mahfouz et al.</i> [12]
- Ethyl ester of Waste vegetable oil - Waste vegetable oil			Less NO <sub>x</sub> and CO	<i>Tashtoush et al.</i> [13] <i>Lapirattanakun and Charoensuk</i> [14]
Blending of - Waste cooking oil - Diesel oil	BR = 0, 20, 40, 60, 80, 100% ER = 0.6 to 1.05		Higher bending ratio, lower exhaust gas temperature and less CO, NO <sub>x</sub>	<i>Mahfouz et al.</i> [15]
- Waste cooking oil	P = 0.5, 1, 1.5, 2 bar T = 90 °C	smaller width and longer penetration	Less CO and NO <sub>x</sub> More O <sub>2</sub>	<i>Mahfouz et al.</i> [16]
- Pulverized coal	BR = coal concentration 0, 0.27, 0.44, 0.62, 0.80		Released rates C and H decreased O <sub>2</sub> 0.41-3.64 %	<i>Li et al.</i> [17]
- Palm oil		The greater spray cone angle, the shorter penetration and at penetration less than 44.3 cm, cone angle more than 27.1° lead to the lowest emissions.		<i>San Jose et al.</i> [18]
- Sludge palm oil	Free fatty acid, FFA, % = $\frac{2.56 \times M \times V}{m_s}$		Lower CO, CO <sub>2</sub> and NO <sub>x</sub>	<i>Muhammad et al.</i> [19]
Blending of - HDO - LDO - Waste cooking oil	B1 (LDO+20% WCO) B2 (HDO+20% WCO)	B2 longer reaction zone than HDO LDO, B1 show shorter flame than HDO, B2		<i>Mahfouz et al.</i> [20]

#### 4. Case study: crude palm oil (CPO) in power plant

##### 4.1. Biomass energy plant in Lumut, Malaysia [31]

PGEO Group Sdn. Bhd. (PGSB) is a major edible oil refiner and exporter in Malaysia. In year 2005, PGSB has completed construction of a biomass-fired steam generator plant in Lumut. The objective is to reduce the amount of steam produced from fuel oil and grid generated power and thus reducing greenhouse gas emission.

The project activity will reduce emission in three ways: (1) displacing fuel oil with palm oil biomass which is used to generate 15 ton per hour of steam, (2) displacing electricity from the national grid by replacing the existing chiller system and (3) generating electric from biomass. From February 2005 until April 2006, reduction of CO<sub>2</sub> emission has increased.

The plant obtained its biomass waste from neighbouring 16 palm oil mills via fuel purchase agreement. In the plant, empty fruit bunches, palm kernel shell and mesocarp fibers from oil palm are used as fuel source.

##### 4.2. Krabi power plant in Thailand [32]

The Thai Government proposed the policy to allow the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) for using crude palm oil as a fuel to generate electricity in Krabi power plant. The policy aims to increase demand for crude palm oil (CPO) and crude palm oil prices.

Krabi power plant is a thermal power plant designed with a capacity of 315 MW and fired by using both fuel oil and CPO. During 2013-2015, 10,000 tons per year of crude palm oil were fired in the power plant and then increased to 15,000 tons per year after 2015.

##### 4.3. Bang Pakong power plant in Thailand [33]

Since January, 2019, EGAT has started the commercial operation of the generator which uses crude palm oil and natural gas with a ratio of 50:50 at Bang Pakong Thermal Power Plant, Unit 3.

Crude palm oil can be used to generate power around 30,000 tons per month, and result in reducing crude palm oil from the market 160,000 tons.

#### 5. Conclusion

5.1. Analyzing fuel properties with different fuel types can be concluded as follow:

- Fuel with higher viscosity, better combustion efficiency.
- Fuel with lower carbon residual, less carbon and smoke.
- Fuel with high Flash point, fire point and Ignition point tend to ignite difficulty.

5.2. Vegetable oil should be preheating at 80-100 °C to increase combustion efficiency.

5.3. Flame characteristic

- The higher air pressure in combustion will increase air velocity. So, chemical reaction between air and fuel will be improved, resulting shorter flame length.

- Lower heating value, shorter flame length.

5.4. Radiation of fuel will decrease when blend crude vegetable oil with fuel oil or diesel.

5.5. Emissions and combustion efficiency: NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> decrease when blend crude vegetable oil with fuel oil or diesel because less nitrogen and sulfur content. However, there are more oxygen content in vegetable oil leading better combustion efficiency.

For further study,

5.6. Crude palm oil is an attractive alternative fuel. Using crude palm oil in direct combustion is not only an energy development to reduce emission problems but also a way to help palm farmers.

5.7 According to research investigation, blending fuel with vegetable oils should be preheated at temperature range 80-100 °C. We assumed that higher preheat temperature need to be examined for higher blending ratio, up to 100% vegetable oils.

5.8 A comparison and optimization between petroleum liquid oil and vegetable oil on operating cost should be investigated.

## 6. Acknowledgement

This work was financially supported by the Research and Development Office (RDO) of Prince of Songkla University (PSU).

## 7. Reference

- [1] Hannah Ritchie, Max Roser, "Renewable Energy" 2020. [online] Available: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>. [1 March,2021].
- [2] Abdeen Mustafa Omer, Energy use and environmental impacts: A general review, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2009, Vol.1.
- [3] Organization for Economic Cooperation and Development, "OECD Green Growth Studies: Energy" 2012. [online] Available: <https://www.oecd.org/greengrowth/greening-energy/49157219.pdf>. [26 March,2021].
- [4] Hannah Ritchie, Max Roser, "Fossil Fuels" 2020. [online] Available: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>. [1 March,2021].
- [5] Dilip Ahuja, Marika Tatsutani, Daniel Schaffer, "Sustainable energy for developing countries" 2009. [online] Available: <https://journals.openedition.org/sapiens/823>. [1 March,2021].
- [6] U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (FEMP), "Biomass For Electricity Generation" 2016. [online] Available: <https://www.wbdg.org/resources/biomass-electricity-generation>. [26 March,2021].
- [7] eia, "Biomass—renewable energy from plants and animals" 2020. [online] Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>. [26 March,2021].
- [8] BioEnergy Consult, "Importance of Biomass Energy" 2020. [online]. Available: <https://www.bioenergyconsult.com/a-glance-at-biomass-energy/>. [1 March,2021].
- [9] PHUSADEE ARUNMAS, YUTHANA PRAIWAN, PITSINEE JITPLEECHEEP, "Palming off the problem" 2019. [online] Available: <https://www.bangkokpost.com/business/1700588/palming-off-the-problem>. [1 March,2021].
- [10] United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service, "data&analysis" 2019. [online] Available: <https://www.fas.usda.gov/data/search>. [1 March,2021].
- [11] Minchul, Suh, World Palm Oil Supply Forecast, Oil Palm Industry Economic Journal, 2020, Vol. 20, pp. 21-27.
- [12] Sate Sampattagula, Pranee Nutongkaewb, Tanongkiat Kiatsiriroata, Life cycle assessment of palm oil biodiesel production in Thailand, International Journal of Renewable Energy, 2011, Vol. 6.
- [13] VIJAYA SUBRAMANIAM, CHOO YUEN MAY, HALIMAH MUHAMMAD, ZULKIFLI HASHIM, YEW AI TAN, PUAH CHIEW WEI, LIFE CYCLE INVENTORY OF THEPRODUCTION OF CRUDE PALM OIL -A GATE TO GATE CASE STUDY OF 12PALM OIL MILLS, Journal of Oil Palm Research, 2008, Vol. 20, pp. 484-494.
- [14] A. Luqman Chuah, A. Fakhru'l-Razi, Boiler Emission Test Using Blended Crude Palm Oil/Medium Fuel Oil as Biofuel: a Case Study in Malaysia, International Review of Biophysical Chemistry (IREBIC), 2014, Vol.5, No.1.
- [15] EGAT, Krabi power plant (2nd) case: CPO and fuel oil co-firing, 2015, pp. 2-10.
- [16] Haswin Kaur A/P Gurdeep Singha, Suzana Yusupa, Cheah Kin Waia, Physicochemical Properties of Crude Rubber Seed Oil for Biogasoline Production, Procedia Engineering 148, 2016, pp. 426 – 431.
- [17] Ion OPREA, Lucian MIHAESCU, Tudor PRISECARU, Gabriel Paul NEGREANU, Manuela Elena GEORGESCU, Elena POPA, Experiment research on crude vegetable oil combustion in a small boiler – 55 kW, Environmental Engineering and Management Journal, 2009, Vol. 8, pp. 475-482.
- [18] Mirnah Suardi, Norazwan Azman, Dahrum Samsudin, S. H. Amirnordin, Norani Mansor, Amir Khalid, Experimental Study of the Ignition Process and Combustion of Biodiesel-water-air Rapid Mixing Derived From Waste Cooking Oil, Crude Palm Oil and Jatropha Oil in Burner Combustion, Applied Mechanics and Materials, 2015, pp. 773-774.

- [19] Nozomu Hashimoto, Hiroyuki Nishida, Masayoshi Kimoto, Kazuki Tainaka, Atsushi Ikeda, Satoshi Umemoto, Effects of Jatropha oil blending with C-heavy oil on soot emissions and heat absorption balance characteristics for boiler combustion, *Renewable Energy*, 2018, Vol.126, pp.924-932.
- [20] Sae Byul Kang, Jong Jin Kim, Yong Hoon Im, An experimental investigation of a direct burning of crude Jatropha oil (CJO) and pitch in a commercial boiler system, *Renewable Energy*, 2013, Vol.54, pp.8-12.
- [21] Abdolsaeid Ganjehkaviri, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Seyed Ehsan Hosseini and Anas Basri Musthafa, Performance Evaluation of Palm Oil-Based Biodiesel Combustion in an Oil Burner, *Energies*, 2016, 9, 97, pp.1-10.
- [22] Ahmed Mahfouz, Ahmed Emara, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, Effect of Waste Cooking - Diesel Oils Blends on Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Industrial Oil Burner, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2017, Vol.5, pp.1264-1274.
- [23] Ghassan Tashtoush, Mohamad I. Al-Widyan and Ali O. Al-Shyoukh, Combustion performance and emissions of ethyl ester of a waste vegetable oil in a water-cooled furnace, *Applied Thermal Engineering*, Vol.23 (2003) pp.285-293.
- [24] Arwut Lapirattanakun, Jarruwat Charoensuk, Development of porous media burner operating on waste vegetable oil, *Applied Thermal Engineering*, Vol.110 (2017) pp.190-201.
- [25] Muhammad Ahmar Zuber, Ahmad Muhsin Ithnin, Wira Jazair Yahya, Ahmad Danish Abd Wahab, Mohamad Azrin Ahmad, Performance of Sludge Palm Oil Combustion Using Waste Oil Burner, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 49, Issue 1, 2018, pp. 55-61.
- [26] Zhengqi Li, Chunlong Liu, Qunyi Zhu, Weiguang Kong, Yang Zhao, Zhichao Chen, Experimental Studies on the Effect of the Pulverized Coal Concentration on Lean-Coal Combustion in a Lateral-Ignition Tiny-Oil Burner, *Energy Fuels*, 2010, 24, pp. 4161-4165.
- [27] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, Ahmed Emara, Comparative study of combustion characteristics and exhaust emissions of waste cooking-diesel oil blends, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, Issue 4, December 2018, pp. 3123-3134.
- [28] Ahmed Mahfouz, H.A. Moneib, Ahmed El-fatih, Ashraf F. El-Sherif, H.S. Ayoub, Ahmed Emara, Comparative study among waste cooking oil blends flame spectroscopy as an alternative fuel through using an industrial burner, *Renewable energy*, 2020, pp. 893-907.
- [29] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, Ahmed Emara, Combustion Characteristics of a Swirled Burner Fueled With Waste Cooking Oil, *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2015*, November 13-19, 2015.
- [30] J. San Jose, M. A. Sanz-Tejedor and Y. Arroyo, Spray Characteristics, Combustion Performance, and Palm Oil Emissions in a Low-Pressure Auxiliary Air Fluid Pulverization Burner, *Energy & Fuels*, 2018, 32, pp. 11502-11510
- [31] S.H. Shuit, K.T. Tan, K.T. Lee, A.H. Kamaruddin, Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study, *Energy* 34, 2009, pp. 1225-1235.
- [32] Apinya Puapattanakul, Athikom Bangviwat, Impact of Crude Palm Oil Co-firing on Electricity Generation Cost in Krabi Power Plant, *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 6, No. 5, 2018, pp.381-384.
- [33] EGAT, "Bang Pakong Power Plant starts operation of generator using crude palm oil to help farmers" 2019. [online]. Available: <https://www.egat.co.th/en/news-announcement/news-release/bang-pakong-power-plant-starts-operation-of-generator-using-crude-palm-oil-to-help-farmers>. [1 March, 2021].

#### ภาคผนวก ค

นิลเนตร จันทร์แก้ว และ มัทตาร์ แวหะยี. “การทบทวนเอกสาร: การศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมัน  
ปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง” การประชุมวิชาการการถ่ายทอดผลงานความ  
ร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 20, เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง  
ประเทศไทยครั้งที่ 36, 18-19 มีนาคม 2564 จ.สงขลา

การทบทวนเอกสาร: การศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิง  
สำหรับการเผาไหม้โดยตรง

A REVIEW: A POTENTIAL STUDY OF CRUDE PALM OIL  
USED AS FUEL FOR DIRECT COMBUSTION

นิลเนตร จันทร์แก้ว

มักตาร์ วะหะมี\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90112

\*E-mail: wmakatar@eng.psu.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาพลังงานทางเลือกโดยใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรงมีความน่าสนใจ นอกจากจะเป็นการพัฒนาในด้านพลังงานแล้ว ยังเป็นการช่วยเพิ่มราคาผลผลิตให้กับเกษตรกรผู้ปลูกปาล์ม บทความนี้เป็นการรวบรวมและทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำมันจากปาล์มและน้ำมันจากพืชอื่น ๆ เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง เช่น เป็นเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม หรือใช้ในการประกอบอาหารในระดับอุตสาหกรรม เป็นต้น ในเบื้องต้นจะกล่าวถึง คุณสมบัติของน้ำมันจากพืชชนิดต่าง ๆ และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเมื่อผสมน้ำมันจากพืชกับน้ำมันเตา, น้ำมันดีเซล เป็นต้น จากนั้นจะกล่าวถึงเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการใช้น้ำมันจากพืชเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง โดยจะอธิบายเกี่ยวกับลักษณะเปลวไฟ, การถ่ายเทความร้อน, ประสิทธิภาพการเผาไหม้, มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ และชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาวิจัยสุดท้ายจะกล่าวถึงกรณีศึกษาการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงร่วมในโรงไฟฟ้ากระบี่และโรงไฟฟ้าบางปะกง

**คำสำคัญ:** เชื้อเพลิง, น้ำมันปาล์มดิบ, การเผาไหม้โดยตรง, ประสิทธิภาพการเผาไหม้

**Abstract**

Using crude palm oil (CPO) as a fuel for direct combustion is an interesting alternative energy development which is not only an energy development but also increasing palm prices for helping palm farmers. In this article, using palm oil and other vegetable oils as fuel for direct combustion, such as using in industrial boilers or in industrial cooking processes, was reviewed. Firstly, properties of vegetable oils and its blend with fuel oil, diesel oil were presented. Then, the study of using vegetable oils as fuel for direct combustion: flame characteristic, radiation, combustion efficiency, emissions and experiment set up, was reported. Finally, the case studs of Krabi and Bang Pakong power plants which applied CPO blend as fuel in co-firing process were also presented.

**Keywords:** Fuel, Crude palm oil, Direct combustion, Combustion efficiency

**1. บทนำ**

รายงานความเคลื่อนไหวด้านมลพิษของกรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และศูนย์วิจัยด้านพลังงานและอากาศสะอาด (CREA) ระบุว่ามูลค่าความเสียหายด้านมลพิษทางอากาศจากเชื้อเพลิงฟอสซิล สูงถึง 8,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐต่อวัน หรือประมาณ 3.3% ของจีดีพีโลก โดย จีน สหรัฐอเมริกา และอินเดีย มีมูลค่าความเสียหายจากมลพิษทางอากาศมากที่สุดในโลกตามลำดับ นอกจากนี้ยังประมาณการได้ว่ามลพิษจาก PM 2.5 และโอโซน ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นสาเหตุทำให้ผู้คนทั่วโลกต้องเข้ารับการรักษาอาการหอบที่ห้องฉุกเฉินสูงถึง 7.7 ล้านครั้งต่อปี ดังนั้นเพื่อลดมลพิษทางอากาศ การหัน

ไปใช้พลังงานทางเลือก พลังงานทดแทน หรือพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดมลพิษทางอากาศได้อีกทางหนึ่ง [1]

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่ตระหนักถึงความสำคัญของประเทศข้างต้น โดยสถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย ในปี 2561 มีข้อมูลว่าประเทศไทยใช้พลังงานรวมทั้งสิ้น 83,691 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมากกว่า 10 ปี และเพิ่มขึ้น 3.7% จากปี 2560 โดยใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ (84.6%) เช่น น้ำมันสำเร็จรูป ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และไฟฟ้า เพิ่มขึ้น 3.9%

และใช้พลังงานทางเลือก (15.4%) เช่น พิน ถ่าน แกลบ กากอ้อย และวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เพิ่มขึ้น 2.2% และคาดว่าแนวโน้มการใช้พลังงานทางเลือกในอนาคตจะยังคงเพิ่มขึ้นต่อไป เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงทางพลังงาน [2]

พลังงานทางเลือกนั้นแบ่งได้เป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ , พลังงานน้ำ, พลังงานลม, พลังงานไฟฟ้าจากขยะและพลังงานจากชีวมวล ในปัจจุบันประเทศไทยได้เริ่มหันมาใช้พลังงานเหล่านี้เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะพลังงานจากชีวมวล เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีวัสดุจากการเกษตร เช่น แกลบ ชี้อย ชานอ้อย กากมะพร้าวจำนวนมาก (เทียบได้น้ำมันดิบปิละไม่น้อยกว่า 6,500 ล้านลิตร) [3] ซึ่งนอกจากจะเป็นการพัฒนาด้านพลังงานแล้ว ยังเป็นการช่วยเหลือภาคเกษตรกรรมเมื่อเกิดปัญหาผลผลิตล้นตลาดอีกด้วย

โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ที่ปลูกปาล์มเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาผลผลิตล้นตลาด ในช่วงต้นปีประมาณมีนาคม – พฤษภาคม และช่วงปลายปีประมาณกันยายน – พฤศจิกายน ส่งผลให้ปาล์มมีราคาตก ดังนั้นเพื่อเป็นการช่วยเหลือเกษตรกร จึงมีการสนับสนุนให้

นำปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า โดยสามารถใช้ได้ทั้งส่วนเส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม และน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil: CPO) [4]

การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเป็นอีกวิธีที่จะช่วยลดจำนวนผลผลิตปาล์มในตลาด โดยการนำน้ำมันปาล์มดิบไปทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซล ซึ่งทำให้สามารถใช้ทดแทนกันได้ แต่เนื่องจากต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้น้ำมันบริสุทธิ์ จึงต้องใช้งบลงทุนที่มาก [5]

บทความนี้สนใจศึกษากรณีการนำน้ำมันปาล์มมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ หรือใช้ในการประกอบอาหารในระดับอุตสาหกรรม เป็นต้น จึงมีจุดประสงค์เพื่อทบทวนและรวบรวมข้อมูลเอกสารงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันชนิดอื่นๆ เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง เพื่อเป็นข้อมูลให้ผู้สนใจได้ศึกษาเพื่อต่อยอดในการทาววิจัย เพื่อพัฒนาพลังงานในอนาคต

ในตอนต้นของบทความจะกล่าวถึงคุณสมบัติเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ จากนั้นนำเสนอเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสุดท้ายจะกล่าวถึงการนำน้ำมันปาล์มดิบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้ากรณีและบางประการ

**2. คุณสมบัติของเชื้อเพลิง**

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติน้ำมันต่างๆ ได้แก่ Fuel oil (FO), Crude palm oil (CPO), Rapeseed oil, Sunflower oil, Crude jatropha oil (CJO), Jatropha biodiesel, Conventional diesel และC-heavy oil ซึ่งเป็นน้ำมันจากกลุ่มผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและพืช

Properties	Unit	Oil										
		FO	CPO	Rapeseed	Sunflower	Lower fuel oil	CJO	Jatropha biodiesel	Conventional diesel	C-heavy oil	CJO	
Viscosity	Cst.	170.3	28.2									
	°E			2.68	2.81	1.4						
Density	mm <sup>2</sup> /s						35.4	4.59	4.84	110.0	25.8	
	kg/dm <sup>3</sup>			0.9185	0.918	0.9						
	g/cm <sup>3</sup>									0.9635	0.9097	
Flash point	°C	71	160				226	182	71	93	248	
Fire point	°C						236	190	76			
Ignition point	°C			267	313	50				408	417	
Pour point	°C	-9	2									
Gross heat of combustion	cal/g	10,166	9,412									
Calorific value	MJ/kg			40.24	39.37	40.6	39.76	45.2	46.22			
HHV	J/g									42,820	39,670	
LHV	J/g									40,450	37,026	
Carbon residual	%wt	11.2	0.41	0.279	0.294	1.0					21.7	

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติน้ำมันต่างๆ ซึ่งเป็นน้ำมันจากกลุ่มผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและพืช จากการศึกษาของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [6] แสดงให้เห็นว่าเมื่อน้ำมันเตา (Fuel oil: FO) กับน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil: CPO) จะมี Viscosity แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่การให้ความร้อนในการเผาไหม้ไม่ต่างกันมาก

อีกทั้ง CPO ยังมีค่า Carbon residual ต่ำซึ่งก่อให้เกิดควันและคราบเขม่าในปริมาณที่น้อยกว่ามาก

จากการศึกษาของ Oprea และคณะ [7] แสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืชทั้งสองชนิด คือเมล็ดจากผักกาดก้านขาว (Rapeseed) และเมล็ดจากดอกทานตะวัน (Sunflower) ซึ่งมี Ignition point สูงกว่า ดังแสดงใน





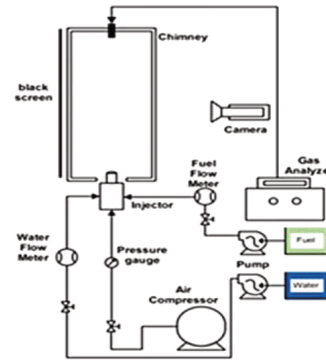
ตารางที่ 1 จึงอาจจุดติดได้ยาก แต่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีกว่า เนื่องจากมีค่า Viscosity สูงกว่าน้ำมันเตาเกรดต่ำ (Low fuel oil)

และจากการศึกษาของ Mimah Suardi และคณะ [8] แสดงให้เห็นว่าน้ำมันดิบจากเมล็ดสบูดำ (Crude jatropa oil: CJO) และน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดสบูดำมี Flash point และ Fire point สูงกว่าน้ำมันดีเซลอาจทำให้จุดติดยาก แต่มีค่า Carbon residual ต่ำกว่าซึ่งก่อให้เกิดมลพิษน้อยกว่า ดังแสดงในตารางที่ 1

**3. เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

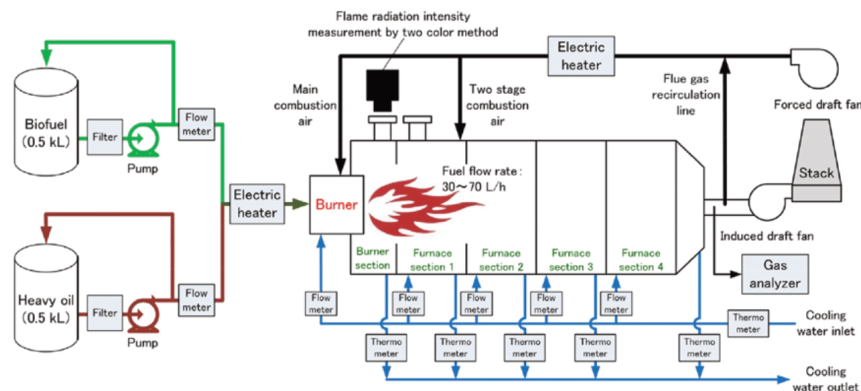
Oprea และคณะ [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้น้ำมันพืชในหม้อไอน้ำขนาด 55 kW เปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเตาเกรดต่ำ (Low fuel oil) กับน้ำมันจากเมล็ดดอกทานตะวัน โดยอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 70-80 °C จากนั้นฉีดเข้าเตาเผาด้วยหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 mm ที่ความดัน 1.35-1.4 mPa จากการศึกษพบว่าน้ำมันจากเมล็ดดอกทานตะวันให้เปลวไฟสีเหลืองอุณหภูมิ 2,000 °C ไม่มีคราบเขม่าและควันเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังให้ประสิทธิภาพและผลจากการเผาไหม้ไม่ต่างจากน้ำมันเตาเกรดต่ำ ยกเว้นทำให้เกิด CO ปริมาณมากกว่า

Suardi และคณะ [8] ได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้ของอัตราส่วนระหว่างน้ำมันไบโอดีเซล น้ำและอากาศที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันจากเมล็ดสบูดำในการเผาไหม้ โดยการปรับปริมาณน้ำ 0, 5, 10, 15% และอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio) 0.6, 1, 1.4 ตามลำดับ โดยรายละเอียดของชุดทดลองได้แสดงในรูปที่ 1 จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ Spray angle เล็กลง แต่ระยะพุ่ง (Penetration) เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ได้ Spray area มากขึ้น นอกจากนี้เปลวไฟจะสั้นลง เมื่อผสมน้ำมันไบโอดีเซลกับน้ำและมีพื้นที่มากขึ้น เมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 รายละเอียดชุดทดลอง Mimah Suardi และคณะ [8]

Hashimoto และคณะ [9] ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันเตาเกรด C 100% และน้ำมันเตาเกรด C แบบผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดสบูดำ โดยผสมกับน้ำมันเตาเกรด C ในอัตราส่วน 50% โดยปริมาณ รายละเอียดของชุดทดลองแสดงในรูปที่ 2 และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 1 จากการทดลองพบว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผสมกันมีคุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันเตาที่ไม่ผสม เนื่องจากน้ำมันเตามีอนุภาคมากกว่าน้ำมันไบโอดีเซล จึงทำให้การแผ่รังสีความร้อนของเชื้อเพลิงที่มีอนุภาคมากมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงที่มีอนุภาคน้อย และเนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีไนโตรเจนและซัลเฟอร์น้อยกว่าน้ำมันเตา ทำให้ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้มีไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เกิดขึ้นน้อย



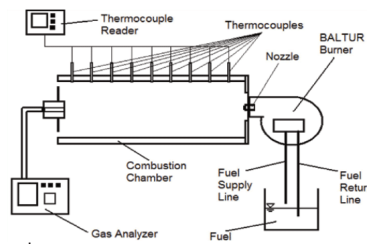
รูปที่ 2 รายละเอียดชุดทดลอง Hashimoto และคณะ [10]

Kang และคณะ [10] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันดิบจากเมล็ดสบูดำเป็นเชื้อเพลิงใช้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยศึกษาผลของการอุ่นน้ำมันดิบจากเมล็ดสบูดำที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 -

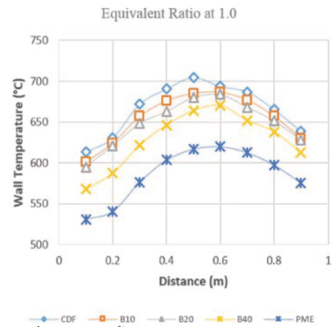
100°C ที่มีผลต่อความเสถียรของเปลวไฟโดยใช้หัวเผาอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว จากการศึกษพบว่าช่วงอุณหภูมิที่สามารถจุดติดไฟและทำให้เปลวไฟมีความเสถียรคือที่อุณหภูมิ 90-100°C



Ganjehkaviri และคณะ [11] ได้ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันดีเซลที่ส่วนผสมต่างๆ ในการทดลองได้ใช้หัวเผาเชื้อเพลิงเหลว (Oil burner) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยวัดอุณหภูมิพื้นผิวของห้องเผาไหม้ตามความยาวของเปลวไฟที่ตำแหน่งต่างๆ และวัดคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย ในการทดลองได้ผสมน้ำมันไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลที่ส่วนผสม 10:90 (B10), 20:80 (B20), 40:90 (B40) นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีน้ำมันดีเซลธรรมดา (CDF, Conventional diesel fuel) และน้ำมันไบโอดีเซลล้วน (PME, Palm methyl ester) จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมมวล ER=1 อุณหภูมิพื้นผิวของห้องเผาไหม้ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมลงในน้ำมันดีเซล โดยการใช้น้ำมันดีเซลธรรมดา (CDF) ทำให้อุณหภูมิบนพื้นผิวของห้องเผาไหม้สูงสุด และน้ำมันไบโอดีเซล (PME) ทำให้อุณหภูมิบนพื้นผิวของห้องเผาไหม้ต่ำสุด สำหรับการวัดไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในก๊าซไอเสียพบว่าค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมลงในน้ำมันดีเซล



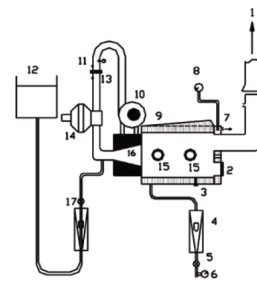
รูปที่ 3 รายละเอียดชุดทดลอง Ganjehkaviri และคณะ [11]



รูปที่ 4 อุณหภูมิพื้นผิวของห้องเผาไหม้ของชุดทดลอง [11]

การทดลองของ Ganjehkaviri และคณะ [11] สอดคล้องกับการทดลองของ Mahfouz และคณะ [12] ที่ผสมน้ำมันพืชใช้แล้วกับกับน้ำมันดีเซล โดยมีสัดส่วนการผสม 0, 20, 40, 60, 80 และ 100% พบว่าคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมน้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ผสมลงในน้ำมันดีเซล

Tashtoush และคณะ [13] ได้ศึกษาการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วเปรียบผลการทดลองกับน้ำมันดีเซล โดยใช้หัวเผาเป็นแบบพ่นฝอย ฉนวนห้องเผาไหม้ถูกระบายความร้อนโดยใช้น้ำตามที่แสดงในรูปที่ 5 จากการทดลองพบว่า ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในก๊าซไอเสียของน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้น้ำมันไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล



- 1- Exhaust
- 2- Photographic observation wind
- 3- Condensate drain
- 4- Cooling water flow meter
- 5- Flow control
- 6- Water inlet temperature
- 7- To drain
- 8- Water outlet temperature
- 9- Water jacket
- 10- Three-stage blower fan
- 11- Air temperature
- 12- Gravity fuel tank
- 13- Orifice
- 14- Air pressure regulator
- 15- Observation windows
- 16- Refractory quartz
- 17- Fuel control

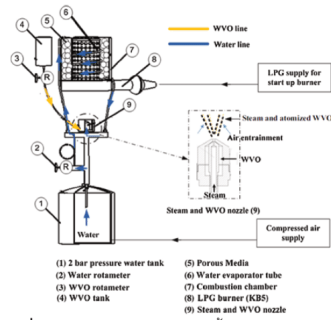
รูปที่ 5 รายละเอียดชุดทดลอง Tashtoush และคณะ [13]

Lapiratanakun และ Charoensuk [14] ได้ออกแบบเตาเผาสำหรับครัวเรือนโดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งปรับปรุงจากเตาเผาแบบเดิมโดยให้ความร้อนน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยไอน้ำ เตาเผาออกแบบเป็นทรงกระบอก 2 ชั้น โดยระหว่างทรงกระบอกทำเป็นวัสดุพรุน ซึ่งบรรจุด้วยลูกบอลเซรามิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยลูกบอลเซรามิกนี้ออกแบบขึ้นมาเพื่อให้เปลวไฟมีความเสถียร และการใช้ไอน้ำช่วยในการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีข้อดี คือ ช่วยลดเขม่าและคาร์บอนมอนอกไซด์ จากการทดลองพบว่าช่วงที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเผาไหม้ คือ อัตราการเผาไหม้ในช่วง 325-548 kW/m<sup>2</sup> และอัตราการไหลของน้ำที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำที่ 0.16 kg/min



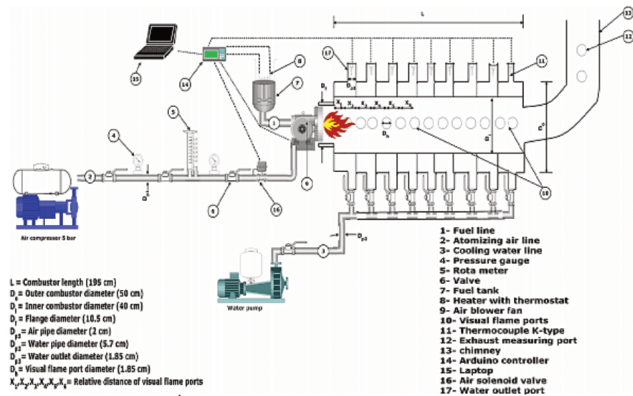
รูปที่ 6 (a) เตาเผาไม่มีวัสดุพรุน, (b) เตาเผาเสริมวัสดุพรุน [14]



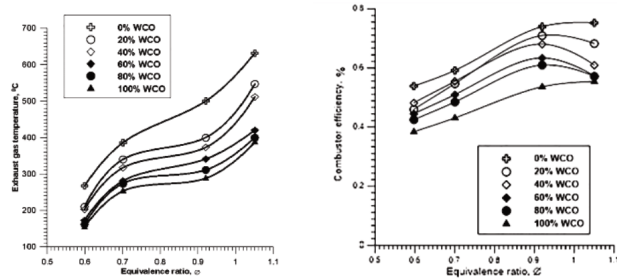


รูปที่ 7 รายละเอียดเตาเผาสำหรับน้ำมันพืชใช้แล้ว [14]

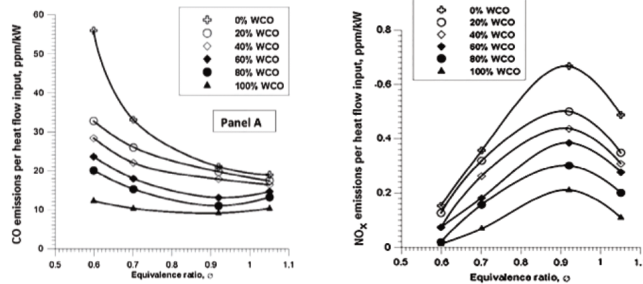
Mahfouz และคณะ [15] ได้ศึกษาลักษณะการเผาไหม้และก๊าซไอเสียของเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้ว (WCO, Waste cooking oil) กับน้ำมันดีเซล (LCO, Light diesel oil) ดังแสดงรายละเอียดชุด



รูปที่ 8 รายละเอียดชุดทดลอง Mahfouz และคณะ [15]

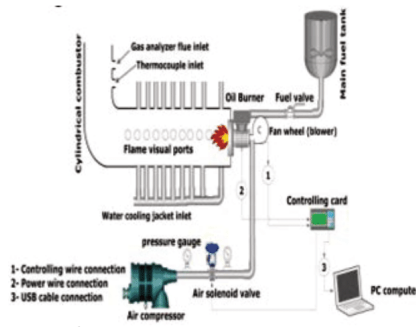


รูปที่ 9 กราฟแสดงอุณหภูมิก๊าซไอเสีย (ซ้าย) และประสิทธิภาพการเผาไหม้ (ขวา), WCO=Waste cooking oil [15]



รูปที่ 10 กราฟแสดงปริมาณ CO (ซ้าย) และ NO (ขวา), WCO=Waste cooking oil [15]

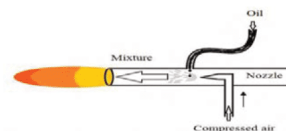
นอกจากนั้น Mahfouz และคณะ [16] ได้ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุนวน (Swirled burner) โดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว (WCO, Waste cooking oil) กับน้ำมันดีเซล (LCO, Light diesel oil) เป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 11 ก่อนเข้าเตาเผาเชื้อเพลิงทั้งสองจะถูกอุ่นจนมีอุณหภูมิ 90°C และ 80°C ตามลำดับเพื่อลดความหนืด (Viscosity) จากนั้นจะถูกเผาที่ความดันของ Primary air ต่างกัน คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 bar ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า WCO ก่อให้เกิด NO<sub>x</sub> และ CO ในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อวิเคราะห์ลักษณะเปลวไฟ พบว่า WCO ให้เปลวไฟเล็กกว่า แต่มีระยะพุ่งไกลกว่า เนื่องจาก WCO มีค่าความหนาแน่นและความหนืดสูงกว่า LCO นอกจากนี้ยังพบว่า WCO ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีกว่า เนื่องจากมีส่วนประกอบออกซิเจนมากกว่า



รูปที่ 11 รายละเอียดชุดทดลอง Mahfouz และคณะ [16]

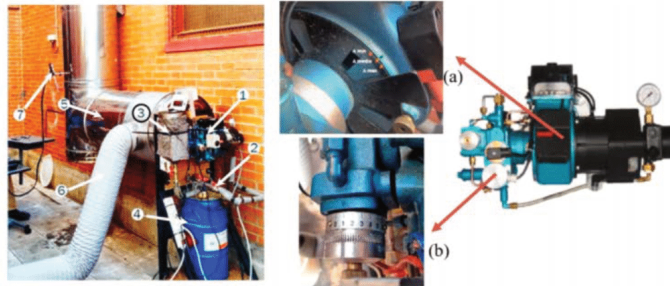
Li และคณะ [17] ได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับปริมาณผงถ่านหินที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ในเตาเผาแบบ Lateral-Ignition Tiny-Oil burner โดยเผาผงถ่านหินด้วยเปลวไฟจากน้ำมันที่ถูกจุดด้วยตัวจุดระเบิดพลังงานสูง จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านหิน 0, 0.27, 0.44, 0.62 และ 0.80 kg ตามลำดับ ทำให้ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ถูกปล่อยออกมามีค่าลดลง ปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 0.41-3.64 % และค่า Burner resistance ลดลงจาก 2,200 เป็น 1,400 Pa

Madhusudan และคณะ [18] ได้ทำการออกแบบหัวเผาน้ำมัน โดยใช้น้ำมันเครื่องใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยติดตั้งอุปกรณ์เก็บน้ำมันที่ความสูง 2 m. เพื่อให้ น้ำมันไหลด้วยแรงโน้มถ่วงจากนั้นน้ำมันจะไหลผ่านท่อทองแดงเข้าสู่หัวเผาที่ตำแหน่งที่เกิดการเผาไหม้โดย LPG และอากาศก่อนหน้า โดยความดันอากาศมีค่าตั้งแต่ 1-3.5 bar จากการศึกษาพบว่า เมื่อความดันอากาศเพิ่มขึ้น ความเร็วของอากาศก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจำนวนมวลอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จับตัวกับอนุภาคน้ำมันได้มากขึ้น ความยาวเปลวไฟจึงลดลง และเมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิของเปลวไฟ พบว่าในบริเวณ Base region ซึ่งเป็นส่วนปลายของหัวเผา มีอนุภาคน้ำมันมากกว่าอากาศ จึงเกิดการเผาไหม้เพียงบางส่วนและมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง เนื่องจากปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ส่วน Core region จะมีอุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ในบริเวณนี้ และมีข้อเสนอแนะให้ทำการ pretreatment เชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้งาน เพื่อลดมลพิษและเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้



รูปที่ 12 รายละเอียดชุดอุปกรณ์หัวเผาน้ำมัน [18]





Photograph of the experimental facility. 1, Burner; 2, valve system; 3, oil tank; 4, diesel fuel tank; 5, combustion chamber; 6, refrigeration air; 7, fume analyzer. (a) Secondary air adjustment; (b) fuel flow adjustment.

รูปที่ 13 รายละเอียดชุดทดลองของ J. San Jose และคณะ [19]

San Jose และคณะ [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการสเปรย์ประสิทธิภาพการเผาไหม้และมลพิษจากน้ำมันปาล์มในเตาเผาแบบ Low-Pressure Auxiliary Air Fluid Pulverization ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยปรับอัตราไหลเชื้อเพลิง 4.1, 6.1 และ 7.3 kg/h จากการศึกษาพบว่าเมื่อ Spray cone angle มีค่ามากขึ้น ระยะพุ่งจะมีค่าลดลง และมลพิษมีค่าน้อยที่สุด ที่ระยะพุ่งน้อยกว่า 44.3 cm, cone angle มากกว่า 27.1° นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ปริมาณ CO และ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ตีขึ้น เมื่ออัตราไหลเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นและอัตราไหลอากาศลดลง โดยอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และมลพิษน้อยคือ อัตราไหลเชื้อเพลิงที่ 6.1 และ 7.3 kg/h และอัตราไหลอากาศที่ 41.10 kg/h

Muhammad และคณะ [20] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม (Sludge palm oil: SPO) เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลโดยใช้หัวเผา น้ำมันพีใช้แล้ว จากการศึกษาพบว่า SPO มี FFA 30% โดยคำนวณจากสมการ

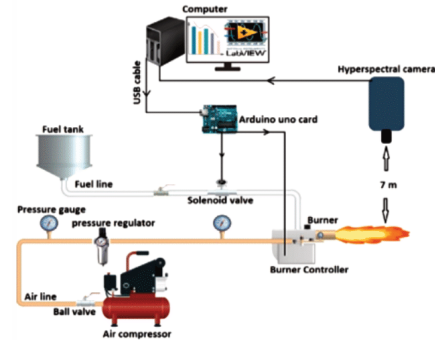
$$FFA, \% = \frac{2.56 \times M \times V}{m_s}$$

โดย M คือ molarity of NaOH (M)  
V คือ volume of titrated NaOH (ml)  
M<sub>s</sub> คือ mass of SPO sample (g)

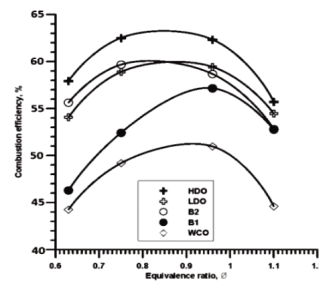
นอกจากนี้ SPO มีค่า density 0.982 g/cm<sup>3</sup>, viscosity 67.76 mm<sup>2</sup>/s ซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล และเนื่องจาก SPO มี viscosity สูงกว่า ปริมาณ CO, CO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> จึงต่ำกว่าน้ำมันดีเซล 34%, 6% และ 90% ตามลำดับ

Mahfouz และคณะ [21] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสเปกโตรสโคปีของเปลวไฟของ HDO, LDO, B1, B2 และ WCO ที่ใช้ในหัวเผาอุตสาหกรรม ซึ่ง B1 และ B2 เป็นส่วนผสมระหว่าง LDO กับ WCO และ HDO กับ WCO ตามลำดับ โดยใช้กล้อง Hyperspectral ตรวจจับลักษณะของเชื้อเพลิง กำหนดอัตราส่วนผสม 0.63, 0.75, 0.96 และ 1.1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 14 เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ พบว่าที่อัตราส่วนผสม 0.85 HDO, LDO และ B1 ให้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 63, 60 และ 60% ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติการแผ่รังสีของเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 15



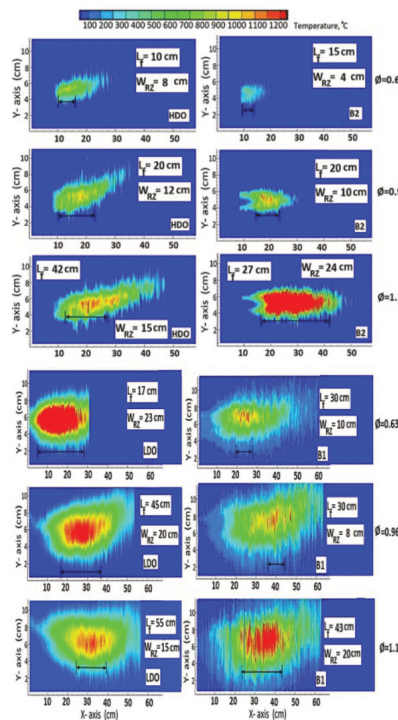
รูปที่ 14 รายละเอียดชุดทดลอง Mahfouz และคณะ [21]



รูปที่ 15 กราฟแสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้

นอกจากนี้ Mahfouz และคณะ [21] ได้วิเคราะห์ Contour map ของอุณหภูมิเชื้อเพลิง พบว่าเชื้อเพลิงผสม B2 ให้เปลวไฟขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ HDO แต่ HDO มีอุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากมี

ส่วนประกอบออกซิเจนมากกว่า และเนื่องจาก LDO และ B1 มีค่า Heating value ต่ำกว่า HDO และ B2 จึงให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้เกิดการระเหยและผสมกันได้เร็ว ทำให้เปลวไฟมีขนาดสั้นกว่า ดังแสดงในรูปที่ 16 ส่วนน้ำมันพืชไหลเปลวไฟค่อนข้างแคบเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงแตกตัวเป็นอะตอมอิสระได้ยาก จึงทำให้เชื้อเพลิงไม่สามารถผสมเข้ากันได้



รูปที่ 16 Contour maps of the cross-sectional spatial average in flame

4. กรณีศึกษา: การใช้น้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

4.1. โรงไฟฟ้ากระบี่ [2] ใช้ น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงหลัก มีขนาดกำลังผลิตติดตั้ง (Gross Capacity) 340 MW กำลังผลิตสุทธิ (Net Capacity) 315 MW โดยมีอัตราการใช้น้ำมันเตาสูงสุด 72 ton/h ที่ค่าความร้อนสูง (HHV) 9,787 kJ/kWh โดยมีค่าประสิทธิภาพความร้อนสุทธิร้อยละ 36.8 สำหรับกรณีการนำน้ำมันปาล์มมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับน้ำมันเตา จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังผลิต โดยใช้น้ำมันเตาในอัตราสูงสุด เท่ากับ 55 และ 18 ton/h ร่วมกับน้ำมันปาล์มดิบ 18 และ 8 ton/h ตามลำดับ

เพื่อรองรับการใช้น้ำมันปาล์มดิบ จึงมีการติดตั้งและปรับปรุงระบบอื่นๆเพิ่มเติม ได้แก่ ถังเก็บน้ำมัน พื้นที่และบ่มสำหรับสูบน้ำมันปาล์ม

ดิบจากรถขนส่งเข้าถึงกักเก็บ ระบบสูบน้ำมันปาล์มดิบเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันปาล์มดิบเป็นไข โดยติดตั้งชุดฮีตเตอร์ภายในถังเก็บน้ำมันปาล์มดิบ รักษาอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มดิบให้อยู่ที่ 50 °C จากนั้นจะส่งน้ำมันปาล์มดิบไปที่ CPO Housing ผ่าน Heat Exchanger อีกครั้งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันให้ที่ 100 °C ก่อนส่งน้ำมันปาล์มดิบเข้าห้องเผาไหม้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์

จากการดำเนินการเผาไหม้น้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำมันเตาในโรงไฟฟ้ากระบี่ พบว่าการปลดปล่อยมลพิษ (Emission) ที่เกิดขึ้นดีกว่าการใช้น้ำมันเตาเพียงอย่างเดียว เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบไม่มีองค์ประกอบของสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณ SO<sub>2</sub> และฝุ่นละอองมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การระบายมลพิษของโรงไฟฟ้ากระบี่ [2]

มลพิษ (Emission)	เชื้อเพลิง	
	น้ำมันเตา	น้ำมันเตา+น้ำมันปาล์มดิบ
NO <sub>x</sub>	180 ppm	180 ppm
SO <sub>2</sub>	163.0 ppm	127.5 ppm
ฝุ่นละออง	71.1 mg/m <sup>3</sup>	61.3 mg/m <sup>3</sup>

แต่เนื่องด้วยเหตุผลด้านต้นทุน ศักยภาพการผลิตและปริมาณการใช้ไฟฟ้า ภาครัฐจึงตัดสินใจนำน้ำมันปาล์มดิบไปใช้ที่โรงไฟฟ้าบางปะกงแทนโรงไฟฟ้ากระบี่

4.2. โรงไฟฟ้าบางปะกง [22] ใช้น้ำมันปาล์มดิบร่วมกับก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักของโรงไฟฟ้า โดยใช้น้ำมันปาล์มดิบประมาณ 960 ตันต่อวัน และก๊าซธรรมชาติประมาณ 34.4 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน ได้กำลังผลิต 300 MW และเพื่อเพิ่มกำลังผลิตเป็น 600 MW จึงเพิ่มปริมาณการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็น 1,500 ตันต่อวัน ร่วมกับก๊าซธรรมชาติปริมาณประมาณ 94.66 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน

จากการดำเนินงานพบว่าการใช้ น้ำมันปาล์มดิบร่วมกับก๊าซธรรมชาติในโรงไฟฟ้าบางปะกง ส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยมลพิษที่ขึ้นเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้ากระบี่ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การระบายมลพิษของโรงไฟฟ้าบางปะกง [22]

มลพิษ (Emission)	เชื้อเพลิง	
	ก๊าซธรรมชาติ	ก๊าซธรรมชาติ+น้ำมันปาล์มดิบ
NO <sub>x</sub>	137.38 ppm	107.38 ppm
SO <sub>2</sub>	2.49 ppm	0.54 ppm
ฝุ่นละออง	3.00 mg/m <sup>3</sup>	2.00 mg/m <sup>3</sup>





## 5. สรุป

- คุณสมบัติของเชื้อเพลิง
  - เมื่อนำเชื้อเพลิงมาเปรียบเทียบกัน เชื้อเพลิงที่มีค่าความหนืดมาก จะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีกว่า
  - เชื้อเพลิงที่มี Flash point, Fire point และ Ignition point สูง อาจจุดติดได้ยาก
  - เชื้อเพลิงที่มีค่า Carbon residual ต่ำ จะทำให้เกิดคราบเขม่าและควันน้อย
- การอุ่นเชื้อเพลิง (Preheating) ควรอุ่นน้ำมันดิบจากพืชให้มีอุณหภูมิ 80-100 °C เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้
- ลักษณะเปลวไฟ (Flame characteristic)
  - เมื่อเพิ่มความดันอากาศในการเผาไหม้ ความเร็วของอากาศก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจำนวนอนุภาคอากาศจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคอากาศจับตัวกับอนุภาคเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ทำให้ระยะเปลวไฟสั้นลง
  - เมื่อนำเชื้อเพลิงมาเปรียบเทียบกัน เชื้อเพลิงที่มีค่า heating value ต่ำกว่า จะให้เปลวไฟสั้น เนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงสามารถระเหยและผสมกันได้เร็วกว่า
- การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เมื่อผสมน้ำมันดิบจากพืชกับน้ำมันเตา หรือน้ำมันดีเซล จะส่งผลทำให้การแผ่รังสีความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง
- มลพิษ (Emission) มลพิษจากการเผาไหม้ เช่น NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub> ลดลง เมื่อผสมน้ำมันดิบจากพืชกับน้ำมันเตา, น้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันดิบจากพืชมีส่วนประกอบไนโตรเจนและซัลเฟอร์น้อยกว่า และมีส่วนประกอบออกซิเจนมากกว่า จึงทำให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีกว่า

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. (2563, 30 เมษายน). พลังงานสะอาด พลังงานทางเลือก ทางออกแก้มลพิษและสร้างความมั่นคงทางพลังงาน. สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2564, จาก <https://www.deqp.go.th/new/พลังงานสะอาด-พลังงานทางเลือก/>
- [2] มุณีสิมมาชีพ. (2563, 6 กุมภาพันธ์). พลังงานทางเลือก... พลังงานที่ "ต้องเลือก". สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2564, จาก <https://www.right-livelihoods.org/scoop/พลังงานทางเลือก...พลังงานที่-ต้องเลือก/>
- [3] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี). (2561, 16 มกราคม). ประเภทของพลังงานทดแทน. สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2564, จาก <http://reo13.mnre.go.th/th/news/detail/9585>
- [4] กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ศักยภาพพลังงานชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน : กรณีศึกษาทะลายเปล่า (Empty Fruit Bunch). สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2564, จาก <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2529>

[5] Energy absolute. ไบโอดีเซล สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2564, จาก <https://www.energyabsolute.co.th/biodiesel.asp>

[6] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.), รายงานการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดโครงการในรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการโรงไฟฟ้าพลังความร้อนกระบี่ (ครั้งที่ 2) กรณีนำน้ำมันปาล์มดิบ มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าร่วมกับน้ำมันเตา, 2558, หน้า 2-10.

[7] Ion OPREA, Lucian MIHAESCU, Tudor PRISECARU, Gabriel Paul NEGREANU, Manuela Elena GEORGESCU, Elena POPA, Experiment research on crude vegetable oil combustion in a small boiler – 55 kW, Environmental Engineering and Management Journal, 2009, Vol. 8, pp. 475-482.

[8] Mirnah Suardi, Norazwan Azman, Dahrum Samsudin, S. H. Amirordin, Norani Mansor, Amir Khalid, Experimental Study of the Ignition Process and Combustion of Biodiesel-water-air Rapid Mixing Derived From Waste Cooking Oil, Crude Palm Oil and Jatropa Oil in Burner Combustion, Applied Mechanics and Materials, 2015, pp. 773-774.

[9] Nozomu Hashimoto, Hiroyuki Nishida, Masayoshi Kimoto, Kazuki Tainaka, Atsushi Ikeda, Satoshi Umamoto, Effects of Jatropa oil blending with C-heavy oil on soot emissions and heat absorption balance characteristics for boiler combustion, Renewable Energy, 2018, Vol.126, pp.924-932.

[10] Sae Byul Kang, Jong Jin Kim, Yong Hoon Im, An experimental investigation of a direct burning of crude Jatropa oil (CJO) and pitch in a commercial boiler system, Renewable Energy, 2013, Vol.54, pp.8-12.

[11] Abdolsaeid Ganjehkaviri, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Seyed Ehsan Hosseini and Anas Basri Musthafa, Performance Evaluation of Palm Oil-Based Biodiesel Combustion in an Oil Burner, Energies, 2016, 9, 97, pp.1-10.

[12] Ahmed Mahfouz, Ahmed Emara, M.S. Gad, Ahmed El Fathi, Effect of Waste Cooking - Diesel Oils Blends on Performance, Emissions and Combustion Characteristics of Industrial Oil Burner, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, 2017, Vol.5, pp.1264-1274.

[13] Ghassan Tashtoush, Mohamad I. Al-Widyan and Ali O. Al-Shyouchk, Combustion performance and emissions of ethyl ester of a waste vegetable oil in a water-cooled furnace, Applied Thermal Engineering, Vol.23 (2003) pp.285-293.

[14] Arwut Lapirattanakun, Jarruwat Charoensuk, Development of porous media burner operating on waste vegetable oil, Applied Thermal Engineering, Vol.110 (2017) pp.190-201.

[15] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, Ahmed Emara, Comparative study of combustion characteristics and exhaust emissions of waste cooking-diesel oil blends, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, Issue 4, December 2018, pp. 3123-3134.

[16] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, Ahmed Emara, Combustion Characteristics of a Swirled Burner Fueled With Waste Cooking Oil, *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2015*, November 13-19, 2015.

[17] Zhengqi Li, Chunlong Liu, Qunyi Zhu, Weiguang Kong, Yang Zhao, Zhichao Chen, Experimental Studies on the Effect of the Pulverized Coal Concentration on Lean-Coal Combustion in a Lateral-Ignition Tiny-Oil Burner, *Energy Fuels*, 2010, 24, pp. 4161-4165.

[18] Madhusudan S, Vismay K G, Gururaja S, Design and Fabrication of Oil Burner, Based on Used Engine Oil as a Sustainable Source of Energy, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, Vol-3, Issue-1, 2017.

[19] J. San Jose, M. A. Sanz-Tejedor and Y. Arroyo, Spray Characteristics, Combustion Performance, and Palm Oil Emissions in a Low-Pressure Auxiliary Air Fluid Pulverization Burner, *Energy & Fuels*, 2018, 32, pp. 11502-11510

[20] Muhammad Ahmar Zuber, Ahmad Muhsin Ithnin, Wira Jazair Yahya, Ahmad Danish Abd Wahab, Mohamad Azrin Ahmad, Performance of Sludge Palm Oil Combustion Using Waste Oil Burner, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 49, Issue 1, 2018, pp. 55-61.

[21] Ahmed Mahfouz, H.A. Moneib, Ahmed El-fatih, Ashraf F. El-Sherif, H.S. Ayoub, Ahmed Emara, Comparative study among waste cooking oil blends flame spectroscopy as an alternative fuel through using an industrial burner, *Renewable energy*, 2020, pp. 893-907.

[22] ฝ่ายสิ่งแวดล้อมโครงการ กฟผ., บทที่ 2 ผลการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อม, 2562.

#### ภาคผนวก ง

นิลเนตร จันทร์แก้ว, วสุ สุขสุวรรณ และ มัทตาร์ แวหะยี. “ผลของความดันหัวฉีดที่มีต่อการเผาไหม้ โดยใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์ม” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36, 19-22 กรกฎาคม 2565 จ.ประจวบคีรีขันธ์



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

AEC-0013



## ผลของความดันหัวฉีดที่มีต่อการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์ม The Effects of Nozzle Pressure on Combustion using Palm Oil Fuel

นิลเนตร จันทร์แก้ว<sup>1</sup>, วสุ สุขสุวรรณ<sup>2</sup>, และ มัณฑารุ เวหะยี<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

\*ติดต่อ: makatar.w@psu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของความดันหัวฉีดที่มีต่อการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์ม หัวเผาเป็นแบบหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถพ่นน้ำมันปาล์มร่วมกับอากาศที่มีความดันให้เป็นละอองสเปรย์ การเตรียมน้ำมันปาล์มจะถูกนำมาอุ่นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปผสมกับอากาศภายในหัวฉีด โดยควบคุมความดันอากาศที่ 20, 40 และ 60 psi ภายในห้องเผาไหม้มีการติดตั้งเปลวไฟโดยใช้เชื้อเพลิงจาก LPG ในการศึกษาได้บันทึกภาพลักษณะของเปลวไฟโดยใช้กล้องดิจิทัล และวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo 350 ผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้ที่มีความดันสูงมีผลทำให้ลักษณะเปลวไฟมีความเสถียรมากกว่าเมื่อเทียบกับความดันต่ำ แต่แก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น

**คำหลัก:** น้ำมันปาล์ม, การเผาไหม้โดยตรง, การอุ่นน้ำมัน, พลังงานทดแทน

### Abstract

The aim of this research is to study the effects of nozzle pressure on combustion using palm oil fuel. A burner 1.5 mm diameter nozzle type which can spray palm oil- pressurised air mixing in small droplet form. Before mixing the oil palm and the pressurised air in the nozzle, the oil fuel was preheated at constant temperature 90 °C. The air pressure was varied at 20, 40 and 60 psi. A pilot flame from LPG domestic stove was installed in a combustion chamber. In the study, A flame characteristics was captured using a digital camera, and flue gas was measured using gas analyzer, Testo 350. The results show that at higher pressure, a flame was more stable when compared to the case of low pressure. However, emission gas increases when the nozzle pressure increased.

**Keywords:** Oil palm, Direct combustion, Preheat temperature, Renewable energy

### 1 บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเริ่มหันมาใช้พลังงานทางเลือกมากขึ้นโดยเฉพาะพลังงานจากชีวมวล [1] เช่น วัสดุเหลือจากการเกษตร แกลบ ชีเสื่อย ชานอ้อย กากมะพร้าว หรือพืชเศรษฐกิจ เช่น ปาล์มน้ำมัน ข้อดีของการพัฒนาพลังงานจากชีวมวลนอกจากจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการช่วยเหลือภาคเกษตรกรเมื่อเกิดสภาวะผลผลิตล้นตลาดอีกด้วย

ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจากประเทศมาเลเซียและอินโดนีเซีย [2] โดยพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ของประเทศไทย

ในปีพ.ศ.2563 เกษตรกรผู้ปลูกปาล์มน้ำมันจึงเจอปัญหาผลผลิตล้นตลาดในช่วงมีนาคม – พฤษภาคม และช่วงกันยายน – พฤศจิกายน ส่งผลให้ปาล์มน้ำมันมีราคาถูก

การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมันเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดจำนวนผลผลิตปาล์มน้ำมันในตลาด โดยการนำน้ำมันปาล์มดิบไปทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซลซึ่งทำให้สามารถใช้ทดแทนกันได้ แต่เนื่องจากต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้น้ำมันที่บริสุทธิ์ [3] จึงมีการสนับสนุนให้นำปาล์มน้ำมันไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า โดยสามารถใช้ได้ทั้งส่วนเส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม และน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil: CPO) [4] งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มดิบเพื่อเป็น

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

## AEC-0013

เชื้อเพลิงเหลวทางเลือกสำหรับทดแทนน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตาในอุตสาหกรรม

Oprea และคณะ [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้น้ำมันพืชในหม้อไอน้ำขนาด 55 kW เปรียบเทียบระหว่างการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเตาเกรดต่ำ (Low fuel oil) กับน้ำมันจากเมล็ดดอกทานตะวัน โดยอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วฉีดเข้าเตาเผาด้วยหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 มิลลิเมตร ที่ความดัน 1.35-1.4 mPa จากการศึกษาพบว่าน้ำมันจากเมล็ดดอกทานตะวันให้เปลวไฟสีเหลืองอุณหภูมิ 2,000 องศาเซลเซียส ไม่มีคราบเขม่าและควันเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังให้ประสิทธิภาพและผลจากการเผาไหม้ไม่ต่างจากน้ำมันเตาเกรดต่ำ ยกเว้นทำให้เกิด CO ปริมาณมากกว่า

Hashimoto และคณะ [6] ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันเตาเกรด C 100% และน้ำมันเตาเกรด C แบบผสมน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดสบู่ดำ โดยผสมกับน้ำมันเตาเกรด C ในอัตราส่วน 50% โดยปริมาณจากการทดลองพบว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผสมกันมีคุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันเตาที่ไม่ผสม เนื่องจากน้ำมันเตามีอนุภาคมากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลจึงทำให้การแผ่รังสีความร้อนของเชื้อเพลิงที่มีอนุภาคมากมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงที่มีอนุภาคน้อยและเนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีไนโตรเจนและซัลเฟอร์น้อยกว่าน้ำมันเตา ทำให้แก๊สไอเสียจากการเผาไหม้มีไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เกิดขึ้นน้อย

Ganjekaviri และคณะ [7] ได้ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันดีเซลที่ส่วนผสมต่างๆ ในการทดลองได้ใช้หัวเผาเชื้อเพลิงเหลว (Oil burner) โดยวัดอุณหภูมิพื้นผิวของห้องเผาไหม้ตามความยาวของเปลวไฟที่ตำแหน่งต่างๆ และวัดคุณสมบัติของแก๊สไอเสีย ในการทดลองได้ผสมน้ำมันไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลที่ส่วนผสม 10:90 (B10), 20:80 (B20), 40:60 (B40) นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีน้ำมันดีเซลธรรมดา (CDF, Conventional diesel fuel) และน้ำมันไบโอดีเซลล้วน (PME, Palm methyl ester) จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนผสม ER=1 อุณหภูมิพื้นผิวของห้องเผาไหม้ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมลงในน้ำมันดีเซล โดยกรณีน้ำมันดีเซลธรรมดา (CDF) ทำให้อุณหภูมิบนพื้นผิวของห้องเผาไหม้สูงสุดและน้ำมันไบโอดีเซล (PME) ทำให้อุณหภูมิมบนพื้นผิวของห้องเผาไหม้ต่ำสุด สำหรับการวัดไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในแก๊สไอเสียพบว่าค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซลที่ผสมลงในน้ำมันดีเซล



Kang และคณะ [8] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันดิบจากเมล็ดสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงใช้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยศึกษาผลของการอุ่นน้ำมันดิบจากเมล็ดสบู่ดำที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 -100 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อความเสถียรของเปลวไฟโดยใช้หัวเผาอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว จากการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิที่สามารถจุดติดไฟและทำให้เปลวไฟมีความเสถียร คือ ช่วงอุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส

Mahfouz และคณะ [9] ได้ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุนวน (Swirled burner) โดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว (WCO, Waste cooking oil) กับน้ำมันดีเซล (LCO, Light diesel oil) เป็นเชื้อเพลิง ก่อนเข้าเตาเผาเชื้อเพลิงทั้งสองจะถูกอุ่นจนมีอุณหภูมิ 90 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับเพื่อลดความหนืด (Viscosity) จากนั้นจะถูกเผาที่ความดันของ Primary air ต่างกัน คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 bar ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า WCO ก่อให้เกิด NO<sub>x</sub> และ CO ในปริมาณที่น้อยกว่า เมื่อวิเคราะห์ลักษณะเปลวไฟพบว่า WCO ให้เปลวไฟเล็กกว่า แต่มีระยะพุ่งไกลกว่า เนื่องจาก WCO มีความหนาแน่นและความหนืดสูงกว่า LCO

นอกจากนี้ Mahfouz และคณะ [10] ได้ศึกษาลักษณะการเผาไหม้และแก๊สไอเสียของเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้ว (WCO, Waste cooking oil) กับน้ำมันดีเซล (LCO, Light diesel oil) โดยผสมน้ำมันพืชที่ใช้แล้วในสัดส่วน 0, 20, 40, 60, 80 และ 100% ตามลำดับ อัตราส่วนผสมกำหนดให้อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1.05 จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของแก๊สไอเสียและประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำมันพืชใช้แล้วในน้ำมันดีเซล นอกจากนี้การเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำมันพืชที่ใช้แล้วในน้ำมันดีเซลยังส่งผลให้มลพิษ (Emission) ในแก๊สไอเสีย เช่น CO, NO<sub>x</sub> ลดลงอีกด้วย โดยส่วนผสมที่แนะนำ คือ ผสมน้ำมันพืชที่ใช้ 20% ซึ่งให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการมีการใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิง จะต้องปรับสภาพโดยการอุ่นน้ำมันที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส จึงสามารถนำมาใช้งานได้ และเมื่อผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซล น้ำมันเตา แก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ เช่น NO<sub>x</sub> CO SO<sub>2</sub> ลดลง เนื่องจากน้ำมันดิบจากพืชมีส่วนประกอบไนโตรเจนและซัลเฟอร์น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามการศึกษารณีความดันหัวฉีดยังมีไม่มากนัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษารณีการปรับความดันหัวฉีดที่ใช้ในการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์ม

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

AEC-0013



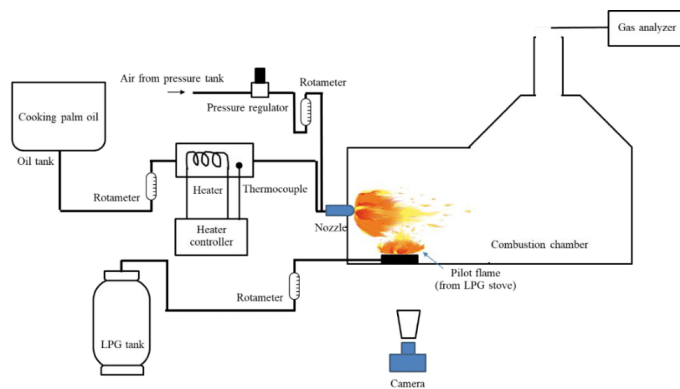
งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของความดันหัวฉีดที่มีต่อการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันปาล์ม ผลจากการศึกษาสามารถพิจารณาการเพิ่มศักยภาพการใช้น้ำมันปาล์มดิบเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับทดแทนน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตาในอุตสาหกรรมต่อไป

## 2 วิธีการทดลอง

### 2.1 ชุดทดลอง

ไดอะแกรมชุดทดลองแสดงในรูปที่ 1 และรูปชุดทดลองแสดงในรูปที่ 2 ชุดทดลองมีหลักการทำงานดังนี้ น้ำมันจากถัง

จะไหลผ่านโรตานิเตอร์เพื่อควบคุมอัตราการไหล จากนั้นจะไหลเข้าสู่ห้องควบคุมความดันซึ่งมีชุดฮีตเตอร์ ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำมัน และมีชุดควบคุมกำลังของฮีตเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิการอุ่นน้ำมัน สุดท้ายน้ำมันจะไหลเข้าหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร น้ำมันจะถูกผสมด้วยอากาศและพุ่งออกมาเป็นละอองสเปรย์ โดยอากาศก่อนที่จะไหลเข้าหัวฉีดมีความดันสูง จากนั้นจะถูกปรับความดันให้ลดลงโดยใช้ Pressure regulator และไหลผ่านโรตานิเตอร์เพื่อควบคุมอัตราการไหล



รูปที่ 1 ไดอะแกรมชุดทดลอง



รูปที่ 2 ภาพถ่ายชุดทดลอง

ภายในห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ได้มีการติดตั้งเปลวไฟล่อ (Pilot Flame) เพื่อใช้ในการจุดน้ำมันปาล์มให้สามารถติดไฟ โดยเปลวไฟล่อใช้เชื้อเพลิงจาก LPG นอกจากนี้ได้ควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจาก LPG เพื่อให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเปลวไฟล่อคงที่ตลอดการทดลอง

### 2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ขายตามท้องตลาดเป็นเชื้อเพลิง คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดตัวแปรควบคุม คือ อุณหภูมิการอุ่นน้ำมันปาล์ม, ตัวแปรต้น คือ ความดันอากาศ และตัวแปรตาม คือ ลักษณะเปลวไฟและคุณสมบัติแก๊สไอเสีย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

### AEC-0013

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ [11, 12]

Properties		Range
Density at 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	860-920
Viscosity at 40 °C	cSt.	39-43
Flash point	°C	161-164
Heating value	MJ/kg	36.5-40.1

การทดลองจะอุ่นน้ำมันปาล์มให้มีอุณหภูมิคงที่ 90 องศาเซลเซียส และปรับความดันอากาศที่ไหลเข้าหัวฉีดที่ 20, 40 และ 60 psi แล้วฉีดเข้าห้องเผาไหม้เหนือเปลวไฟล่อ (Pilot flame) จากนั้นรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วจึงทำการบันทึกภาพลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟด้วยกล้องดิจิทัล และวัดปริมาณแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นบริเวณปล่องควินเหนือห้องเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย TESTO 350 ตามที่แสดงคุณสมบัติการวัดแก๊สในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย TESTO 350

Parameter	Accuracy
O <sub>2</sub> (0 to 25 Vol%)	± 0.8 Vol.%
CO <sub>2</sub> (0 to 50 Vol%)	± 0.3 Vol.%
CO (0 to 10,000 ppm)	± 10 ppm
NO (0 - 4,000 ppm)	± 5 ppm
NO <sub>2</sub> (0 - 500 ppm)	± 5 ppm
SO <sub>2</sub> (0 - 5,000 ppm)	± 5 ppm

### 3 ผลการทดลอง

#### 3.1 ลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟ

รูปที่ 3 แสดงลักษณะทางกายภาพของเปลวที่อุณหภูมิการอุ่นเชื้อเพลิง 90 องศาเซลเซียส และปรับความดันอากาศที่ 20 40 และ 60 psi ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเผาไหม้โดยใช้ความดันอากาศ 20 psi ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) มีขนาดของเปลวไฟเล็กที่สุด เนื่องจากการเผาไหม้โดยใช้ความดันยังไม่เหมาะสมทำให้ยังมีละอองสเปรย์บางส่วนยังไม่ถูกเผาไหม้ และเมื่อเพิ่มความดันอากาศที่ 40 psi ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) ลักษณะของเปลวไฟและละอองสเปรย์ใกล้เคียงกับความดันอากาศ 20 psi แต่สำหรับกรณีที่เผาไหม้โดยใช้ความดันอากาศ 60 psi ดังแสดงในรูปที่ 3 (ค) จะสังเกตเห็นว่าเปลวไฟมีความยาวมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ในช่วงนี้สามารถเผาไหม้ละอองสเปรย์ได้ดีที่สุด ซึ่งจากการ



พิจารณาลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟ แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้น้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสรวมกับอากาศที่ความดันสูงจะทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น



(ก) 20 psi



(ข) 40 psi



(ค) 60 psi

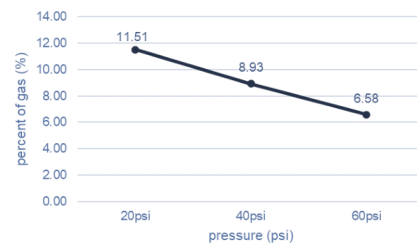
รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟ  
(อุณหภูมิการอุ่นเชื้อเพลิง 90 องศาเซลเซียส)

#### 3.2 คุณสมบัติแก๊สไอเสีย

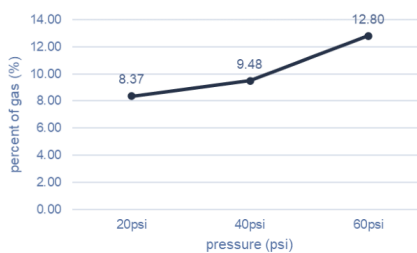
รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแก๊สไอเสียที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย TESTO 350 โดยรูปที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และรูปที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในแก๊สไอเสีย ที่ได้เผาไหม้ร่วมกับความดันอากาศที่ตำแหน่งหัวฉีด 20, 40 และ 60 psi ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แก๊สไอเสียแสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันอากาศเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนมีค่าลดลง แต่เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความดันอากาศ 60 psi มีค่าแก๊สออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ต่ำสุด คือ 6.58% และค่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สูงสุด คือ 12.80%

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

### AEC-0013

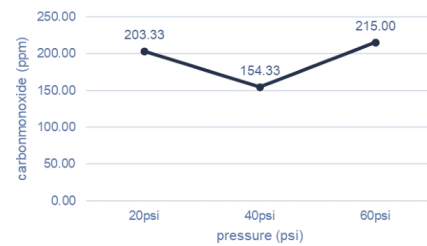


รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) กับกับความดันหัวฉีด



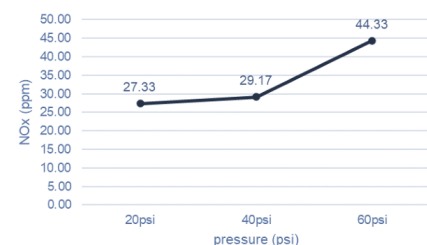
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) กับกับความดันหัวฉีด

สำหรับรูปที่ 6 แสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และรูปที่ 7 แสดงความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ซึ่งทั้งสองแก๊สเป็นมลพิษที่ได้จากการเผาไหม้ จากการวิเคราะห์แก๊สไอเสียพบว่า ที่ความดันอากาศ 40 psi มีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) น้อยที่สุด คือ 154.33 ppm และสำหรับที่ความดันอากาศ 20 และ 60 psi มีปริมาณของแก๊สที่ใกล้เคียงกัน คือที่ 203.33 และ 215 ppm ตามลำดับ โดยปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้ง 3 กรณี มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการกำหนดไว้ไม่เกิน 690 ppm [13]



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับกับความดันหัวฉีด

สำหรับปริมาณของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ดังแสดงในรูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์แก๊สแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์สูงขึ้นเมื่อความดันอากาศที่หัวฉีดสูงขึ้น โดยปริมาณของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่มีปริมาณสูงที่สุดคือ 44.33 ppm ที่ความดันอากาศ 60 psi และมีปริมาณต่ำที่สุดที่ 27.33 ppm ที่ความดันอากาศ 20 psi ซึ่งปริมาณของแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ในทุกกรณีมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยไอเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการกำหนดไม่เกิน 200 ppm [13]



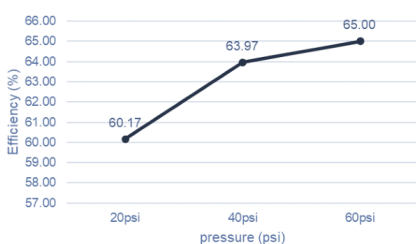
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) กับกับความดันหัวฉีด

สำหรับรูปที่ 8 แสดงประสิทธิภาพของการเผาไหม้ที่ความดันอากาศต่างๆ โดยเป็นค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo 350 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเผาไหม้น้ำมันละอองเสปรย์น้ำมันปาล์มที่มีการอุ่นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า ความดันอากาศมีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยเมื่อเพิ่มความดันอากาศให้สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นด้วย โดยที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงสุด เกิดขึ้นที่ความดันหัวฉีด 60 psi โดยมีประสิทธิภาพ 65 %



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

## AEC-0013



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับความดันหัวฉีด

### 4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการเผาไหม้ละอองเสปรย์น้ำมันปาล์ม โดยอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และใช้ร่วมกับอากาศที่มีความดันสูง 20 40 และ 60 psi สามารถสรุปได้ว่า

1) ที่การเผาไหม้ร่วมกับความดันอากาศ 60 psi ให้เปลวไฟขนาดใหญ่ที่สุด เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำให้ละอองน้ำมันติดไฟได้ง่ายขึ้นประกอบกับความดันอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปลวไฟพุ่งได้ไกลขึ้นและมีขนาดใหญ่

2) เมื่อวิเคราะห์ค่าแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้กรณีต่างๆ พบว่ากรณีความดันอากาศ 20 และ 40 psi เกิดแก๊สไอเสียน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ความดันอากาศ 60 psi โดยกรณีความดันอากาศ 20 psi เกิดแก๊สไอเสียลดลง  $CO_2 = 34.61\%$ ,  $CO = 5.43\%$  และ  $NO_x = 38.35\%$  และกรณีความดันอากาศ 40 psi เกิดแก๊สไอเสียลดลง  $CO_2 = 25.94\%$ ,  $CO = 28.22\%$  และ  $NO_x = 34.20\%$  เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีความดัน 60 psi แต่ทั้ง 3 กรณียังอยู่ในมาตรฐานของการควบคุมการปลดปล่อยไอเสียจากการเผาไหม้ในภาคอุตสาหกรรม

3) สำหรับประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ความดันอากาศ 60 psi ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุด 65% เนื่องจากความดันอากาศสูงช่วยให้เชื้อเพลิงแตกตัวได้ดี ทำให้น้ำมันและอากาศผสมกันดีขึ้น จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ

### 5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG6505015M



### 6 เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี) (2561). *ประเภทของพลังงานทดแทน*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://reo13.mnre.go.th/>, เข้าดูเมื่อ 13/01/2564.
- [2] Chaiwat Sowcharoensuk (2563). *แนวโน้มนวัตกรรม/อุตสาหกรรม ปี 2563-2565: อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www.krungsri.com>, เข้าดูเมื่อ 13/01/2564.
- [3] กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. *ศักยภาพพลังงานชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน : กรณีศึกษาทะเลาะเปลว (Empty Fruit Bunch)*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://webkc.dede.go.th/>, เข้าดูเมื่อ 13/01/2564.
- [4] Energy absolute. *ไบโอดีเซล*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www.energyabsolute.co.th>, เข้าดูเมื่อ 13/01/2564.
- [5] Ion OPREA, Lucian MIHAESCU, Tudor PRISECARU, Gabriel Paul NEGREANU, Manuela Elena GEORGESCU, and Elena POPA. (2009). Experiment research on crude vegetable oil combustion in a small boiler – 55 kW, *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol. 8, June 2009, pp. 475-482.
- [6] Nozomu Hashimoto, Hiroyuki Nishida, Masayoshi Kimoto, Kazuki Tainaka, Atsushi Ikeda, and Satoshi Umemoto. (2018). Effects of Jatropa oil blending with C-heavy oil on soot emissions and heat absorption balance characteristics for boiler combustion, *Renewable Energy*, Vol.126, October 2018, pp.924-932.
- [7] Abdolsaeid Ganjehkaviri, Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Seyed Ehsan Hosseini, and Anas Basri Musthafa. (2016). Performance Evaluation of Palm Oil-Based Biodiesel Combustion in an Oil Burner, *Energies*, February 2016, pp.1-10.
- [8] Kang, S. B., Kim, J. J., Im, Y. H. (2013). An experimental investigation of a direct burning of crude jatropa oil and pitch in a commercial boiler system, *Renewable energy* 54, June 2013, pp.8-12.
- [9] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, and Ahmed Emara. (2015). Combustion

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

**AEC-0013**

Characteristics of a Swirled Burner Fueled With Waste Cooking Oil, *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2015*, November 13-19, 2015.

[10] Ahmed Mahfouz, M.S. Gad, Ahmed El Fatih, and Ahmed Emara. (2018). Comparative study of combustion characteristics and exhaust emissions of waste cooking-diesel oil blends, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, Issue 4, December 2018, pp. 3123-3134.

[11] Christian R. Parra, Adriana Corrêa-Guimarães, Luis Manuel Navas-Gracia, Ricardo A. Narváez C, Daniel Rivadeneira, Darío Rodríguez, and Angel D. Ramirez. (2020). Bioenergy on Islands: An Environmental Comparison of Continental Palm Oil vs. Local Waste Cooking Oil for Electricity Generation, *Appl. Sci.* May 2020, 10, 3806.

[12] Zahoor Ullah, Mohamad Azmi Bustam, and Zakaria Man. (2014). Characterization of Waste Palm

Cooking Oil for Biodiesel Production, *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, Vol. 5, No. 2, April 2014.

[13] ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. (2549, 18 พฤษภาคม). *ราชกิจจานุเบกษา* เล่ม 123 ตอน 50 ง. หน้า 9-14.



ภาคผนวก จ

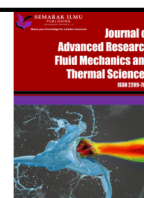
Nilnet Jankaew, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Maizirwan Mel and Makatar Wae-hayee, **The Effects of Pressure and Temperature on Flame Characteristics of Crude Palm Oil Combustion**, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 98, Issue 2 (2022) 165-174.





## Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences

Journal homepage:  
[https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid\\_mechanics\\_thermal\\_sciences/index](https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/index)  
 ISSN: 2289-7879



### The Effects of Pressure and Temperature on Flame Characteristics of Crude Palm Oil Combustion

Nilnet Jankaew<sup>1,2</sup>, Mohd Faizal Mohideen Batcha<sup>3</sup>, Arkom Palamanit<sup>4</sup>, Maizirwan Mel<sup>5</sup>, Makatar Wae-hayee<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90112, Thailand

<sup>2</sup> Energy Technology Research Center, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

<sup>3</sup> Center for Energy and Industrial Environment Studies, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 86400 Parit Raja, Johor, Malaysia

<sup>4</sup> Energy Technology Program, Department of Specialized Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

<sup>5</sup> Department of Biotechnology Engineering, Faculty of Engineering, International Islamic University, Malaysia

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 3 April 2022  
 Received in revised form 11 July 2022  
 Accepted 24 July 2022  
 Available online 18 August 2022

##### Keywords:

Crude palm oil; direct combustion;  
 combustion characteristics; flame

#### ABSTRACT

Using vegetable oil as a direct combustion fuel is an interesting energy development of lower emissions fuel. In this work, commercial cooking oil extracted from palm oil was burned using a typical nozzle having a diameter of 2 mm. Nozzle gage pressure and preheat temperature of palm oil were varied at 20, 40, 60 psi and 70, 90, 110 °C, respectively. Combustion oxidizer was air at room temperature. Equivalence ratio of ER= 1.1. To initiate combustion of the oil, a pilot flame from LPG with fixed firing rate was placed under the oil spray using a domestic stove. The experimental results shown that higher preheat temperatures and pressure accelerated combustion reactions of palm oil. The simulation also shown the same result as the experimental results. The higher preheat temperature and pressure led to high temperature, large size and long penetration of flame. The largest flame size was at 110 °C and 60 psi.

#### 1. Introduction

Since the Industrial revolution, the energy mix of most countries across the world has become dominated by fossil fuels. The global greenhouse gas emissions 75% result from the burning of fossil fuels that are responsible for large amounts of air pollution and a health problem which leads to at least 5 million deaths each year. To reduce CO<sub>2</sub> emissions and air pollution, the world needs to rapidly shift towards low-carbon sources of energy – renewable energy [1-4].

Biomass energy, one of renewable energy sources, has played a significant role because it offers environmental and social benefits. Moreover, it can be converted into electricity and heat by the most common technique that is called direct combustion [5-7] and become a vital part of the global energy mix and account for an ever-growing share of electric capacity added worldwide [8].

\* Corresponding author.

E-mail address: [wmakatar@eng.psu.ac.th](mailto:wmakatar@eng.psu.ac.th)

<https://doi.org/10.37934/arfmts.98.2.165174>

Several biofuels have been studied to solve emission problems. Hashimoto *et al.*, [9] studied the combustion characteristics compared 100% C-heavy oil with 50% C-heavy oil-crude jatropha oil (CJO) blending. The result shows that NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions of C-heavy oil-CJO blending were greatly decreased because the nitrogen and sulfur contents in CJO were significantly lower than C-heavy oil. Mahfouz *et al.*, [10] studied the effects of waste cooking - diesel oil blending: 0, 20, 40, 60, 80 and 100% on performance, emissions, and combustion characteristics of industrial oil burner. It was found that NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and CO emissions decrease when percentage volume of waste cooking oil increases. Muhammad *et al.*, [11] studied performance of sludge palm oil (SPO) combustion using waste oil burner compared with diesel. SPO was lower in CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions during the combustion compared to diesel around 34%, 6% and 90 % reduction respectively.

According to some researcher, the results show that vegetable oil released fewer emissions compared with other oil, and blending fuel was less in emissions as well. So, this study focuses on using palm oil which is a high commercial value products in Southeast Asia.

Considering in Southeast Asia, palm oil production is estimated at 72.26 million ton in 2019. Indonesia is expected to produce the biggest share at 40.50 million ton, followed by Malaysia at 20.50 million ton. The two countries account for 84.4% of global production. Thailand ranks third, producing 2.90 million ton a year or 4% of global output [12-15].

According to the US Department of Agriculture data (USDA, 2020), in average, the palm oil harvested areas in Southeast Asia had grown a lot and led to a huge increase in palm oil production in the year 2018-2019 [16]. Due to the oversupply of palm oil, the market price of crude palm oil (CPO) went to a historic low. The governments try to lift the price up by using policies such as biodiesel and fuel in co-firing process [17].

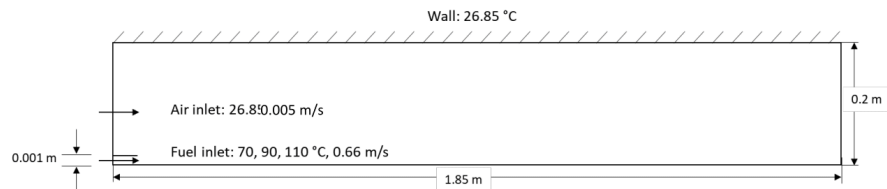
Producing biodiesel from palm oil requires a great number of materials and energy. During the production process, several kinds of emissions are released and affect the environment [18]. Therefore, using crude palm oil as fuel for direct combustion such as in a boiler or industrial cooking process is another interesting development. It is not only to decrease emissions but also a way to help palm farmers.

This study focuses on using palm oil as fuel for direct combustion. Experiment and simulation of palm oil-air combustion were studied. An experiment attempts to investigate flame characteristics. Before entering a combustion chamber, palm oil is preheated 70, 90 and 110 °C with varied air pressure 20, 40 and 60 psi. Pilot flame is used for initial ignition of the fuel-air mixture. Flue gas analyzer, TESTO 350, is used to measure exhaust gas components. The simulation approach used to compare flame characteristics results and study additional result due to an experiment limitation. Computational fluid dynamics (CFD) ANSYS Fluent software is applied to investigate palm oil combustion simulation with same preheat temperature and air pressure conditions.

## **2. Methodology**

### **2.1 Modelling**

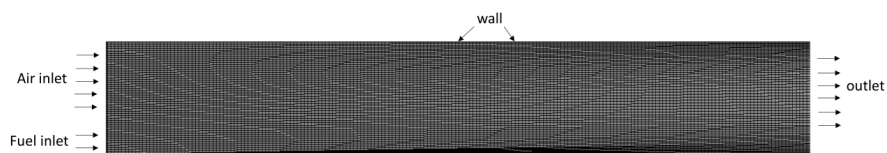
In this study, Computational fluid dynamics (CFD) ANSYS Fluent 2019 R3 software is used. Design modelling as shown in Figure 1. A 2 mm-diameter nozzle in the centre of a combustion chamber is used to introduces palm oil. Palm oil enters a combustion chamber with varied preheat temperature 70, 90 and 110 °C at 0.66 m/s. Ambient air enters a combustion chamber at 0.005 m/s. The overall equivalence ratio is 1.1.



**Fig. 1.** Design Modelling

## 2.2 Mesh

Grid generation is shown in Figure 2. The grid-dependent test was varied in the element number of 5,000 – 15,000 elements. It was found that the saturated elements which were not changing the results significantly were 12,000 elements. These element numbers were selected to apply to all CFD runs.



**Fig. 2.** Meshing

## 2.3 Solution Setup

Table 1 shows general and model setting. Palm oil-air combustion model was studied in axisymmetric 2D-space with energy equation and standard k-epsilon (2eqn). To simplify combustion investigation, the palm oil was given as gas phase. Species transport model was chosen to induce fuel to model. Table 2 shows boundary condition for fuel inlet and air inlet.

**Table 1**  
General and model setting

Property	Value
2D space	Axisymmetric
Energy equation	On
Viscous	k-epsilon (2eqn)
Species	Species transport
Reactions	Volumetric
Mixture material	Palm oil-Air
Turbulence-chemistry Interaction	Eddy-Dissipation

**Table 2**  
Boundary condition

Condition	Fuel inlet	Air inlet
Diameter (m)	0.002	0.4
Velocity (m/s)	0.66	0.005
Temperature (°C)	70, 90, 110	26.85
Materials	Palm oil	Air

Table 3 shows palm oil ultimate analysis. The palm oil sample was tested at Office of Scientific Instrument and Testing (OSIT), Prince of Songkla University (PSU), Thailand. CHNS/O Analyzer (Thermo Quest, FlashEA 2000 model, Italy) is used for analyzing the elements C, H, N, S and O in samples by the method of burning samples at high temperature into mixture gas. Then, enter the column to separate and measure the number of elements in the sample. Table 4 shows palm oil property, chemical formula, MW, density, etc., to study palm oil-air combustion [18]. To check convergence of results, define all absolute criteria in residual monitors 0.0001 and run calculation with number of Iteration 100000.

**Table 3**

Palm oil ultimate analysis

Sample	Unit	C	H	O	N
Palm oil	%wt	75.625±0.204	11.775±0.037	12.581±0.070	0.021±0.001

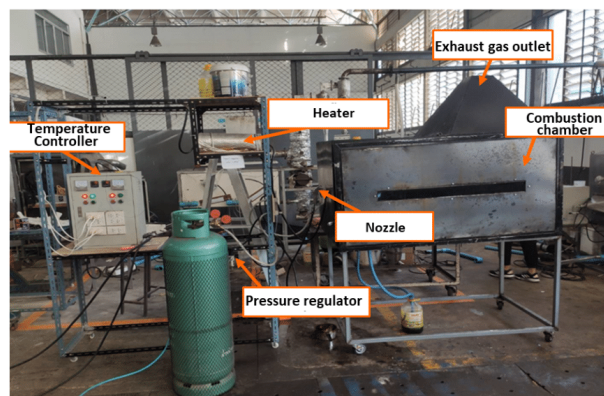
**Table 4**

Palm oil property [19]

Property	70 °C	90 °C	110 °C
Chemical formula	$C_{48}H_{90}O_6$	$C_{48}H_{90}O_6$	$C_{48}H_{90}O_6$
MW (kg/kmol)	744.38	744.38	744.38
Density (kg/m <sup>3</sup> )	865.4	856.1	847.1
$C_p$ (j/kg·K)	1988	2049	2113
Thermal cond. (w/m·k)	0.1683	0.1668	0.1653
Viscosity (kg/m·s)	0.01275	0.008087	0.005709

#### 2.4 Experimental Setup

An experimental set up as shown in Figure 3. The fuel supply system is included of main tank for feeding fuel via a rotameter to control fuel flow rate. Then, heater with temperature controller is used to preheat palm oil 70, 90 and 110 °C. The air supply system consisted of air compressor, pressure regulator and an air rotameter to provide air with pressure 20, 40 and 60 psi. Palm oil and air enter a combustion chamber through 2-mm diameter nozzle. Pilot flame is used for initial ignition of the fuel-air mixture during start-up of combustion reaction. Flue gas analyzer, TESTO 350, is used to measure exhaust gas components in this experiment as shown in table 5.



**Fig. 3.** An Experimental set up

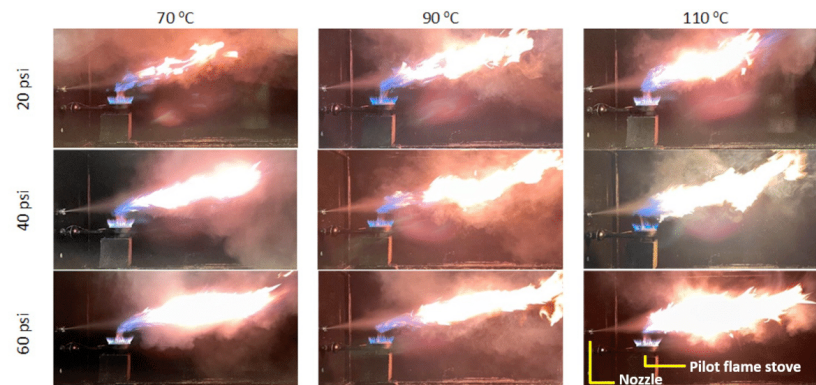
**Table 5**  
TESTO350 exhaust gas measurement [20]

Parameter	Accuracy
O <sub>2</sub> (0 to 25 vol.%)	± 0.8 vol.%
CO <sub>2</sub> (0 to 50 vol.%)	± 0.3 vol.%
CO (0 to 10,000 ppm)	± 10 ppm
NO (0 - 4,000 ppm)	± 5 ppm
NO <sub>2</sub> (0 - 500 ppm)	± 5 ppm
SO <sub>2</sub> (0 - 5,000 ppm)	± 5 ppm

### 3. Results

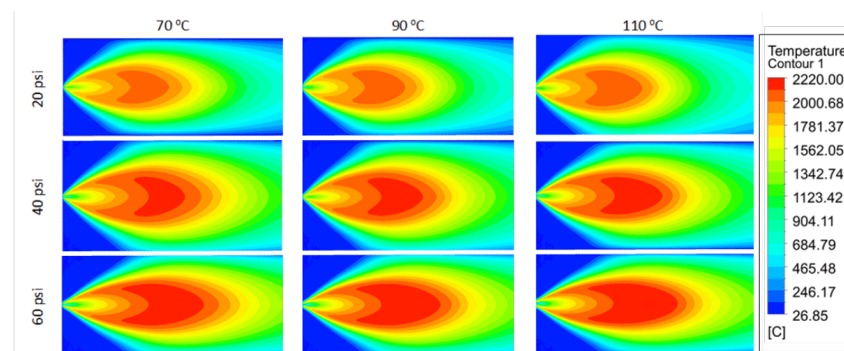
#### 3.1 Flame Characteristics

Figure 4 shows the largest flame size was at preheat temperature 110 °C and pressure 60 psi. The higher preheat temperature and pressure can accelerate combustion reactions.



**Fig. 4.** Flame characteristics (experimental results)

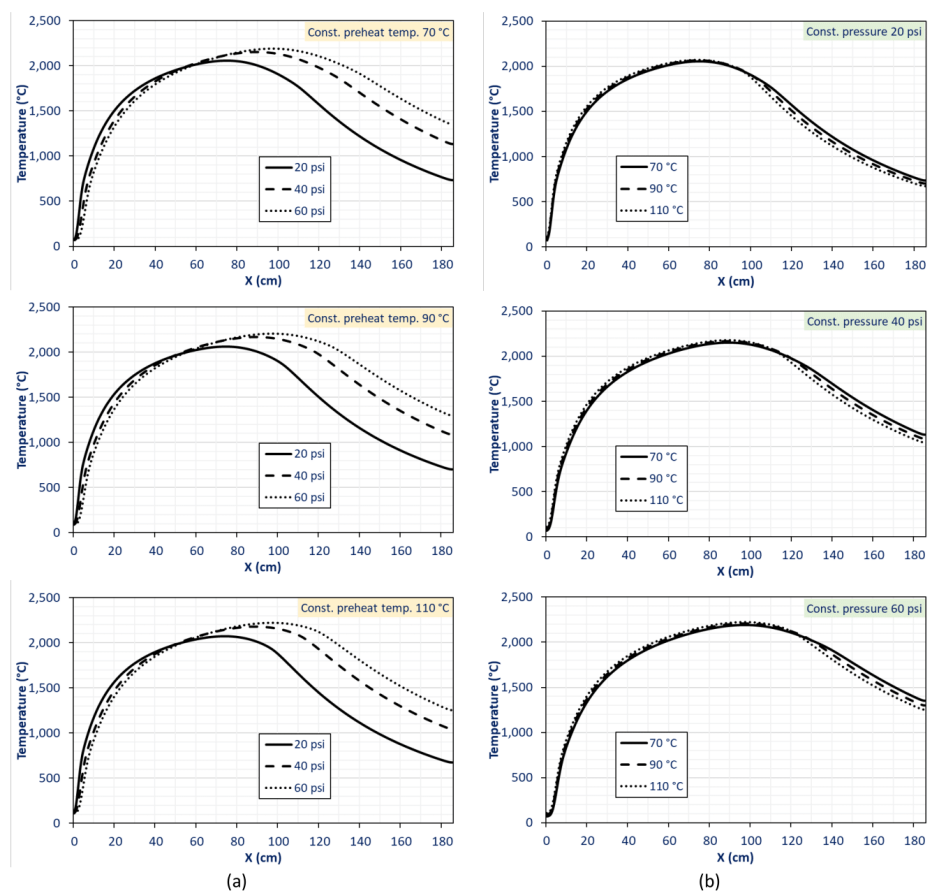
Figure 5 shows the highest temperature was at preheat temperature 110 °C and pressure 60 psi. High temperature areas of the flame of CFD results (Figure 5) were similar to the flame size of experimental results (Figure 4). The higher preheat temperature and pressure led to high temperature, large flame size and long penetration of flame.



**Fig. 5.** Flame characteristics (CFD results)

### 3.2 Temperature Graph

The temperature along chamber length from an inlet increases rapidly and then begins to drop to the end of the chamber (185 cm). Figure 6(a) constant preheat temperature with varied pressure, the temperature start dropping at 60 cm. The highest temperature is at 60 psi and followed by 40 and 20 psi respectively. Figure 6(b) the highest temperature is at a chamber length 80, 90 and 100 cm for pressure condition 20, 40 and 60 psi respectively.



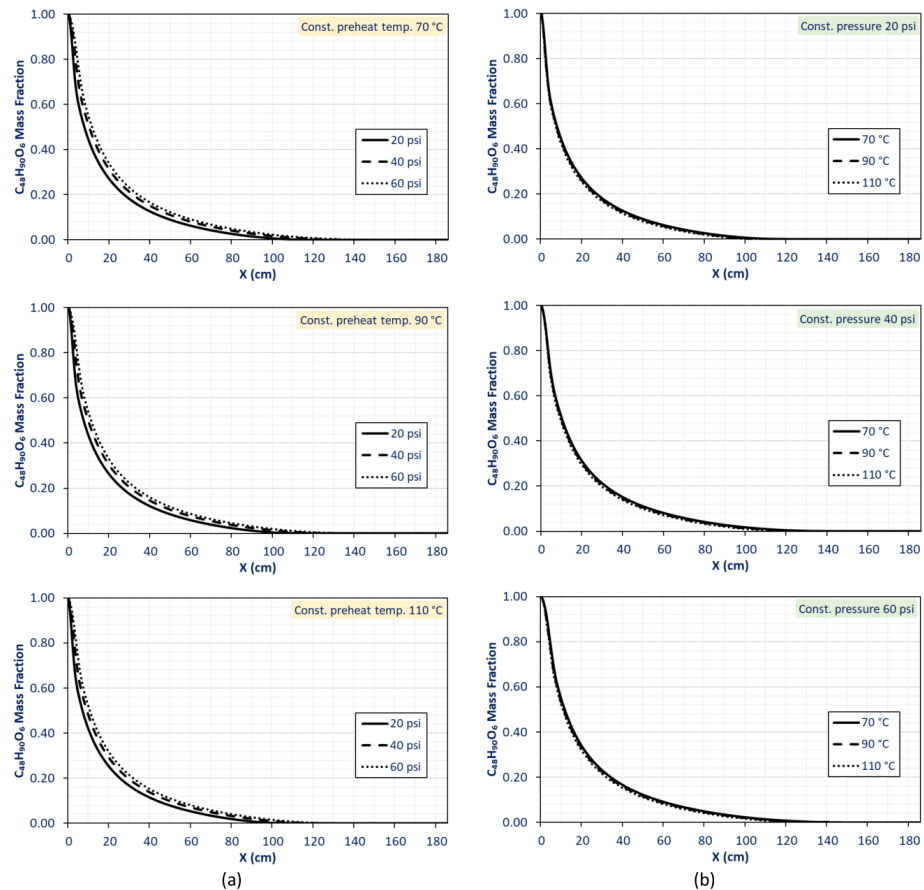
**Fig. 6.** Temperature graph along a combustion chamber length (a) constant preheat temperature, varied pressure, (b) constant pressure, varied preheat temperature (CFD results)

### 3.3 Palm Oil Graph

Considering Figure 7, palm oil is a reactant that used in combustion reaction. Therefore, palm oil mass fraction decreases rapidly and become 0 at a chamber length 100-120 cm. The higher preheat



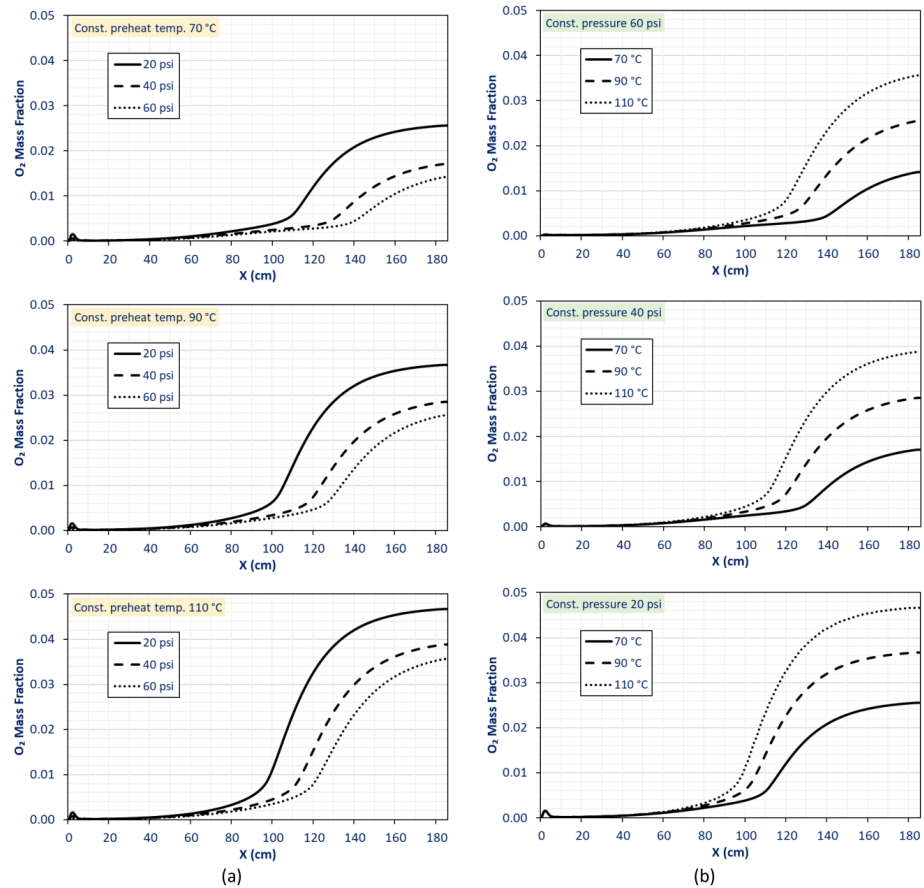
temperature, the faster palm oil mass fraction decreases as shown in Figure 7(a). For constant pressure varied preheat temperature, all the conditions show similar results as shown in Figure 7(b).



**Fig. 7.** Palm oil mass fraction along a combustion chamber length (a) constant preheat temperature varied pressure, (b) constant pressure varied preheat temperature (CFD results)

### 3.4 $O_2$ Graph

Considering Figure 8,  $O_2$  is also a reactant that used in combustion reaction. When combustion reaction occurs,  $O_2$  mass fraction increases slightly due to excess air in a chamber. Then,  $O_2$  mass fraction rises rapidly at a chamber length 100-120 cm because there is not enough palm oil. So, air that enters a chamber is excess air.

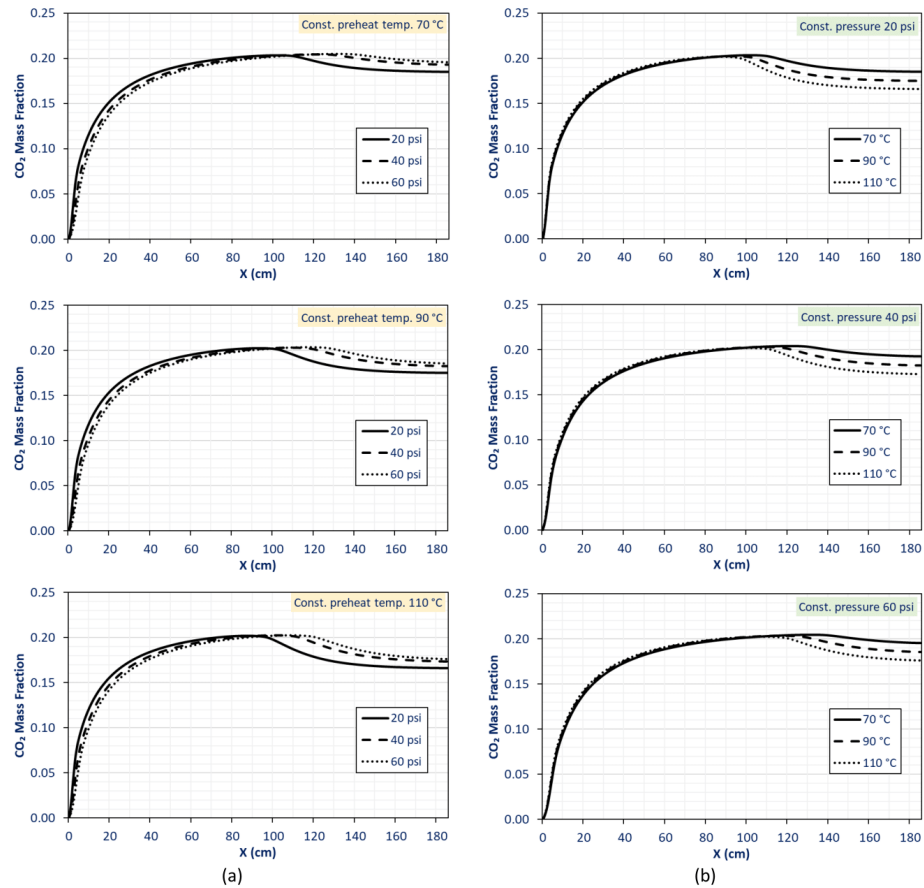


**Fig. 8.** O<sub>2</sub> mass fraction along a combustion chamber length (a) constant preheat temperature varied pressure, (b) constant pressure varied preheat temperature (CFD results)

### 3.5 CO<sub>2</sub> Graph

Considering Figure 9, CO<sub>2</sub> mass fraction increases rapidly at a chamber length from an inlet to 40 cm because C is converted into CO<sub>2</sub> and CO, an increase in CO<sub>2</sub> showed better combustion and lower in CO. Then, CO<sub>2</sub> mass fraction keeps increasing slightly and starts to fall at a chamber length 100-120 cm due to no combustion reaction. Referring to Figure 7 palm oil mass fraction becomes 0 at 100-120 cm. So, there is no reactant to continue combustion reaction.





**Fig. 9.** CO<sub>2</sub> mass fraction along a combustion chamber length (a) constant preheat temperature varied pressure, (b) constant pressure varied preheat temperature (CFD results)

#### 4. Conclusion

This study focused on Palm oil-air combustion with species transport and compared with experimental results. The flame characteristics of simulation results were similar to the experimental results. The higher preheat temperature and pressure led to high temperature, large size and long penetration of flame. Moreover, the simulation results shown that the higher preheat temperature and pressure can accelerate combustion reaction. Temperature along a chamber length become higher and palm oil mass fraction decreases faster when palm oil-air combustion in high preheat temperature and pressure condition.

### Acknowledgement

This research was supported by the National Science, Research and Innovation Fund (NSRF) and Prince of Songkla University (Grant No ENG6505015M). We also thank the Energy Technology Research Unit (ETRC) of PSU for partial support to Miss Nilnet Jankaew during this work.

### References

- [1] Hannah Ritchie, Max Roser, "Renewable Energy" 2020. [online] Available: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>.
- [2] Omer, Abdeen Mustafa. "Energy use and environmental impacts: A general review." *Journal of renewable and Sustainable Energy* 1, no. 5 (2009): 053101. <https://doi.org/10.1063/1.3220701>
- [3] Organization for Economic Cooperation and Development, "OECD Green Growth Studies: Energy" 2012.
- [4] Hannah Ritchie, Max Roser. "Fossil Fuels" 2020.
- [5] Dilip Ahuja, Marika Tatsutani, Daniel Schaffer, "Sustainable energy for developing countries" 2009.
- [6] U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (FEMP), "Biomass For Electricity Generation" 2016.
- [7] Eia. "Biomass-renewable energy from plants and animals" 2020.
- [8] BioEnergy Consult, "Importance of Biomass Energy" 2020.
- [9] Hashimoto, Nozomu, Hiroyuki Nishida, Masayoshi Kimoto, Kazuki Tainaka, Atsushi Ikeda, and Satoshi Umemoto. "Effects of Jatropha oil blending with C-heavy oil on soot emissions and heat absorption balance characteristics for boiler combustion." *Renewable Energy* 126 (2018): 924-932. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.018>
- [10] Mahfouz, Ahmed, Ahmed Emara, M. S. Gad, and Ahmed El Fatih. "Effect of waste cooking-diesel oils blends on performance, emissions and combustion characteristics of industrial oil burner." *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol* 5 (2017): 1264-1274. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.9182>
- [11] Zuber, Muhammad Ahmar, Ahmad Muhsin Ithnin, Wira Jazair Yahya, Ahmad Danish Abd Wahab, and Mohamad Azrin Ahmad. "Performance of sludge palm oil combustion using waste oil burner." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 49, no. 1 (2018): 55-61.
- [12] Phusadee Arunmas, Yuthana Praiwan, Pitsinee Jitpleecheep, "Palming off the problem" 2019.
- [13] Alimalbari, Ameen, Sherly Hanifarianty, Anil Kumar, Thanet Khomphet, Theera Eksomtramage, and Makatar Wae-hayee. "Effects of pressed palm conditions on acceleration of palm drying rate and CPO quality." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 55, no. 1 (2019): 12-19.
- [14] Husin, Akmal Hakim, Syahmil Hakim Hamzani, Shahrin Hisham Amirnordin, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Rafiuddin Wahidon, and Makatar Wae-hayee. "Drying Studies of Oil Palm Decanter Cake for Production of Green Fertilizer." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 97, no. 2 (2022): 66-79. <https://doi.org/10.37934/arfmts.97.2.6679>
- [15] Pakdeechot, Siravit, Makatar Wae-hayee, and Sherly Hanifarianty. "Effects of Sterilization Times of Palm Bunches on Fruit-Bunch Separation, Crude Palm Oil Yield and Quality Using Direct Steaming." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 82, no. 2 (2021): 39-46. <https://doi.org/10.37934/arfmts.82.2.3946>
- [16] United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service, "data&analysis" 2019.
- [17] Minchul, Suh. "World Palm Oil Supply Forecast", *Oil Palm Industry Economic Journal* 20, (2020): 21-27.
- [18] Prapaspongsa, Trakarn, Charongpun Musikavong, and Shabbir H. Gheewala. "Life cycle assessment of palm biodiesel production in Thailand: impacts from modelling choices, co-product utilisation, improvement technologies, and land use change." *Journal of Cleaner Production* 153 (2017): 435-447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.130>
- [19] Chempro "Technical Information Palm Oil Properties".
- [20] TESTO "testo 350 · Flue gas analyzer Instruction Manual".

**ภาคผนวก ฉ**

สำเนาได้รับการยินยอมจากผู้พิมพ์ผลงาน



Nilnet Jankaew &lt;nilnet.j@gmail.com&gt;

---

**Request permission to reprint an article ( Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences)**

2 ข้อความ

---

**Nilnet Jankaew** <nilnet.j@gmail.com>  
ถึง: "azwadi@utm.my" <azwadi@utm.my>

24 กรกฎาคม 2566 เวลา 14:24

Dear Editor-in-chief,  
Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences

I'm Nilnet J., an author of "The Effects of Pressure and Temperature on Flame Characteristics of Crude Palm Oil Combustion"

I would like to request permission to reprint the article for thesis book.

Nilnet Jankaew, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Maizirwan Mel, Makatar Wae-hayee, **The Effects of Pressure and Temperature on Flame Characteristics of Crude Palm Oil Combustion**, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 98, Issue 2 (2022) 165-174.

Thank you in advance,  
Nilnet J.

---

**NOR AZWADI BIN CHE SIDIK FKM** <azwadi@utm.my>  
ถึง: Nilnet Jankaew <nilnet.j@gmail.com>

24 กรกฎาคม 2566 เวลา 15:24

Hi

permission granted.

Thanks

[ข้อความที่เกี่ยวข้องถูกซ่อนไว้]

DISCLAIMER: The information in this e-mail and any attachment(s) transmitted with it ("Message") is intended only for the use of the intended recipient(s) and may contain confidential or privileged information. UTM are not responsible for any unauthorised changes made to the information or for the effect of such changes. You are hereby notified that any action in reliance upon, or any review, retransmission, dissemination, distribution, printing or copying of this Message or any part thereof by anyone other than the intended recipient(s) is strictly prohibited. Any opinions, conclusions and other information in this Message that do not relate to the official business of UTM shall be understood as neither given nor endorsed by UTM. UTM shall not be liable for loss or damage caused by viruses transmitted by this Message.

ภาคผนวก ช

Manuscript

Nilnet Jankaew and Makatar Wae-hayee, **The Effects of Pressure and Temperature  
on Flame Characteristics of Crude Palm Oil Combustion**

## Flame Characteristics and Emissions of Palm Oil Combustion

Nilnet Jankaew<sup>1</sup>, and Makatar Wae-hayee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90112, Thailand

### ABSTRACT

Renewable energy, biomass, has played a significant role for offering environmental and social benefits. This study focuses on using palm oil, a well-known biomass in Thailand, in direct combustion process to develop low emissions fuel. Experimental and numerical study were performed to investigate palm oil-air combustion. Commercial cooking oil extracted from palm oil was preheated with temperature of preheat 140, 160 and 180 °C then, injected through a 2mm-diameter typical nozzle. Combustion oxidizer was air at room temperature with pressure 20, 40 and 60 psi. Equivalence ratio of ER= 0.16. To initiate combustion of the oil, a pilot flame from LPG with fixed firing rate was placed under the oil spray using a domestic stove. The experimental results shown that higher preheat temperature and pressure accelerated combustion reactions of palm oil-air. The numerical study also shown the same result as the experimental results. The higher preheat temperature and pressure led to high temperature, large size and long flame penetration. The largest flame size was at 180 °C and 60 psi.

**Keywords:** Palm oil; Combustion; Flame characteristics; Emission

### 1. Introduction

Since the Industrial revolution, the energy mix of most countries across the world has become dominated by fossil fuels. The global greenhouse gas emissions 75% result from the burning of fossil fuels that are responsible for large amounts of air pollution and a health problem which leads to at least 5 million deaths each year. To reduce CO<sub>2</sub> emission and air pollution, the world needs to rapidly shift towards low-carbon sources of energy – renewable energy [1-4].

Biomass energy, one of renewable energy sources, has played a significant role because it offers environmental and social benefits. Moreover, it can be converted into electricity and heat by the most common technique that is called direct combustion [5-7] and become a vital part of the global energy mix and account for an ever-growing share of electric capacity added worldwide [8].

Several biofuels have been studied to solve emission problems. Hashimoto et al. [9] studied the combustion characteristics compared 100% C-heavy oil with 50% C-heavy oil-crude jatropha oil (CJO) blending. The result shows that NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions of C-heavy oil-CJO blending were greatly decreased because the nitrogen and sulfur contents in CJO were significantly lower than C-heavy oil. Mahfouz et al. [10] studied the effects of waste cooking - diesel oil blending: 0, 20, 40, 60, 80 and 100% on performance, emissions, and combustion characteristics of industrial oil burner. It was found that NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and CO emissions decrease when percentage volume of waste cooking oil increases. Muhammad et al. [11] studied performance of sludge palm oil (SPO) combustion using waste oil burner compared with diesel. SPO was lower in CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions during the combustion compared to diesel around 34%, 6% and 90% reduction respectively.

According to some researchers, the results show that vegetable oil released fewer emissions compared with other oil, and blending fuel was less in emissions as well. So, this study focuses on using palm oil which is a high commercial value product in Southeast Asia.

Considering in Southeast Asia, palm oil production is estimated at 72.26 million tons in 2019. Indonesia is expected to produce the biggest share at 40.50 million ton, followed by Malaysia at 20.50 million ton. The two countries account for 84.4% of global production. Thailand ranks third, producing 2.90 million ton a year or 4% of global output [12-15].

According to the US Department of Agriculture data (USDA, 2020), on average, the palm oil harvested areas in Southeast Asia had grown a lot and led to a huge increase in palm oil production in the year 2018-2019 [16]. Due to the oversupply of palm oil, the market price of crude palm oil

(CPO) went to a historic low. The governments try to lift the price up by using policies such as biodiesel and fuel in co-firing process [17].

Producing biodiesel from palm oil requires a great number of materials and energy. During the production process, several kinds of emissions are released and affect the environment [18]. Therefore, using crude palm oil as fuel for direct combustion such as in a boiler or industrial cooking process is another interesting development. It is not only to decrease emissions but also a way to help palm farmers.

In a previous study, palm oil with preheat temperature 70, 90 and 110 °C, air pressure 20, 40 and 60 psi were studied [19]. To achieve better results, this study also focuses on using palm oil as fuel for direct combustion. Experimental and numerical study of palm oil-air combustion were investigated. An experiment attempts to investigate flame characteristics. Before entering a combustion chamber, palm oil is preheated 140, 160 and 180 °C with varied air pressure 20, 40 and 60 psi. Pilot flame is used for initial ignition of the fuel-air mixture. Flue gas analyzer, TESTO 350, is used to measure exhaust gas components. The numerical approach is used to compare flame characteristics results and study additional results due to an experiment limitation. Computational fluid dynamics (CFD) ANSYS Fluent software is applied to investigate palm oil combustion simulation with same preheat temperature and air pressure conditions.

## 2. Methodology

### 2.1 Experimental study

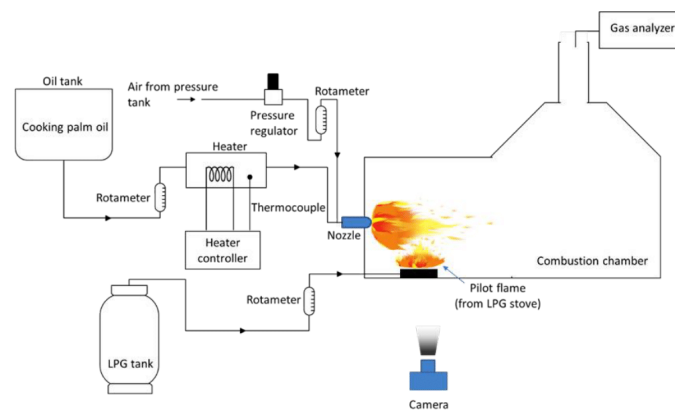


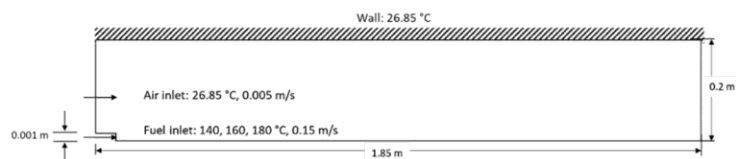
Fig. 1 An experimental setup diagram

An experimental set up as shown in Fig.1. The fuel supply system includes the main tank for feeding fuel via a rotameter to control fuel flow rate. Then, a heater with temperature controller is used to preheat palm oil 140, 160 and 180 °C. The air supply system consisted of an air compressor, pressure regulator and an air rotameter to provide air with pressure 20, 40 and 60 psi. Palm oil and air enter a combustion chamber through a 2-mm diameter nozzle. Pilot flame is used for initial ignition of the fuel-air mixture during start-up of combustion reaction. Flue gas analyzer, TESTO 350, is used to measure exhaust gas components in this experiment.

## 2.2 Numerical study

### 2.2.1 Modelling

In this study, Computational fluid dynamics (CFD) ANSYS Fluent 2019 R3 software is used. Design modelling as shown in Fig. 2. A 2 mm-diameter nozzle is used to introduce palm oil. Palm oil enters a combustion chamber with varied preheat temperatures of 140, 160 and 180 °C at 0.15 m/s. Ambient air enters a combustion chamber at 0.005 m/s.



**Fig.2** Combustion chamber modelling

### 2.2.2 Solution setup

Table 1 shows general and model setting. Palm oil-air combustion model was studied in axisymmetric 2D-space with energy equation and standard k-epsilon (2eqn). To simplified combustion investigation, set fuel in gas phase. Species transport model was chosen to induce fuel to model. Table 2 shows boundary condition for fuel inlet and air inlet.

**Table 1** General and model setting

Property	Value
2D space	Axisymmetric
Energy equation	On
Viscous	k-epsilon (2eqn)
Species	Species transport
Reactions	Volumetric
Mixture material	Palm oil-Air
Turbulence-chemistry Interaction	Eddy-Dissipation

**Table 2** Boundary condition

Condition	Fuel inlet	Air inlet
Diameter (m)	0.002	0.4
Area (m <sup>2</sup> )	$3.14 \times 10^{-6}$	0.124
Velocity (m/s)	0.15	0.005
Mass flow rate (kg/m <sup>3</sup> )	$3.14 \times 10^{-6}$	$7.89 \times 10^{-4}$
Volume flow rate (lpm)	0.03	40
Temperature (°C)	140, 160, 180	26.85
Materials	Palm oil	Air

Table 3 shows fatty acid composition of refined palm oil (RPO) [20]. For this study, the main content in RPO, Oleic acid (C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>), is used as chemical formula of palm oil.

Table 4 shows palm oil property, molecular weight, density, specific heat capacity, thermal conductivity and viscosity to study palm oil-air combustion [21]. To check convergence of results, define all absolute criteria in residual monitors 0.0001 and run calculation with number of iteration 100000.



**Table 3** Fatty acid composition of palm oil [20]

Fatty Acid	RPO
Capric acid (C10:0)	0.11 ±0.03
Lauric acid (C12:0)	1.58 ±0.05
Myristic acid (C14:0)	4.74 ±0.02
Palmitic acid (C16:0)	1.55 ±0.01
Palmitoleic (C16:1)	12.50 ±0.03
Stearic acid (C18:0)	1.82 ±0.04
Oleic acid (C18:1)	76.27 ±0.05
Linoleic acid (C18:2)	0.16 ±0.06
Linolenic acid (C18:3)	0.08 ±0.03
Arachidic acid (C20:0)	0.82 ±0.06
Erucic acid (C22:1)	0.37 ±0.0

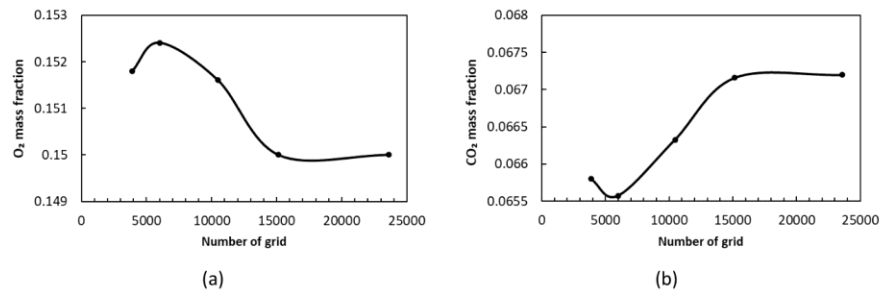
**Table 4** Palm oil property [21]

Property	140 °C	160 °C	180 °C
Density (kg/m <sup>3</sup> )	834.2	825.9	818
C <sub>p</sub> (j/kg·K)	2214	2284	2358
K (w/m·k)	0.1633	0.1621	0.131
Viscosity (kg/m·s)	0.003857	0.003151	0.002662

### 2.1.3 Grid dependency test

Grid dependency is used to determine the optimum mesh for the solution, which is neither too coarse to generate inaccurate results, nor consumes a lot of computing effort and time.

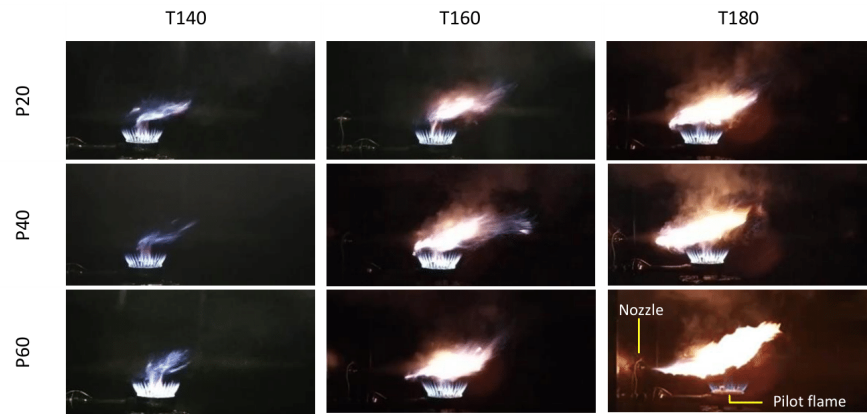
Fig. 3 shows O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> mass fraction with varied grid numbers. 15000 grids give similar results to 23000 grids as shown in Fig. 2. In order to reduce calculating time, 15000 grids are sufficient for the analysis.

**Fig. 3** Emission with varied grid number (a) O<sub>2</sub>, (b) CO<sub>2</sub>

**3. Result**

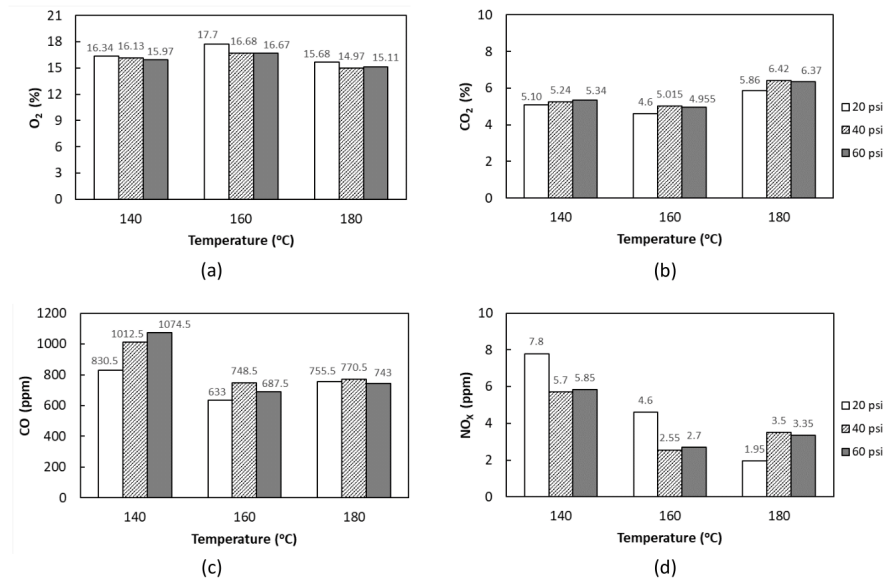
**3.1 Experimental results**

**3.1.1 Flame characteristics**



**Fig. 4** Flame characteristics

**3.1.2 Emissions**



**Fig. 5** Emissions (a) O<sub>2</sub>, (b) CO<sub>2</sub>, (c) CO and (d) NO<sub>x</sub>

The experimental results show that the smallest flame size is at preheat temperature 140 °C since fuel temperature is not high enough for all fuel spray to start ignition. The flame size becomes larger when preheat temperature is higher. The largest flame size is at preheat temperature 180 °C, air pressure 60 psi. Higher preheat temperature with high air pressure results in larger flame size due to more efficient combustion as shown in Fig. 4.

Fig. 5 shows the number of emissions. When preheat temperature and air pressure are getting higher, O<sub>2</sub>, CO and NO<sub>x</sub> tend to decrease but CO<sub>2</sub> increases.

### 3.2 Numerical results

#### 3.2.1 Temperature contour

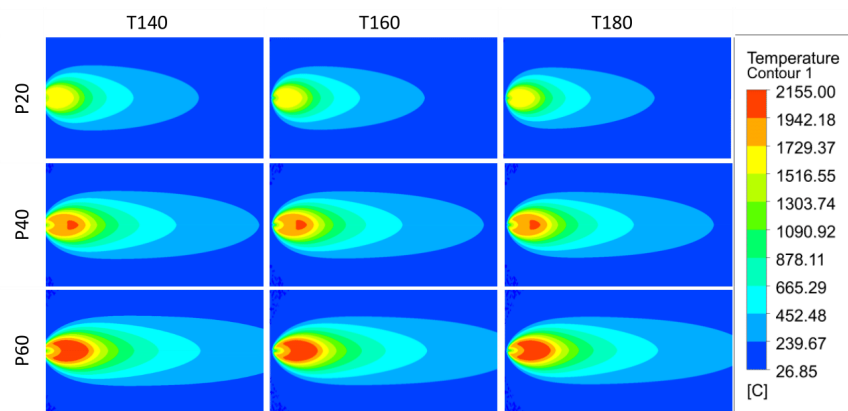


Fig. 6 Temperature contour

**Table 5** Maximum temperature

Pressure (psi)	140 °C	160 °C	180 °C
20	1661.81	1662.27	1662.86
40	1963.98	1963.66	1963.42
60	2152.45	2153.21	2154.12

Fig. 6 shows numerical results, temperature contour. Preheat temperature of 140 °C shows the lowest temperature. Preheat temperature of 180 °C with air pressure 60 psi shows the highest temperature 2154.12 °C. The numerical results are in great agreement with flame size (experimental results) in Fig.5. The higher preheat temperature and pressure lead to high temperature, large flame size and long flame penetration.

### 3.2.2 Palm oil mass fraction

Considering Fig. 7, palm oil is a reactant that is used in combustion reaction. Therefore, palm oil mass fraction decreases rapidly and becomes 0 at a chamber length 25-35 cm. as shown in Fig. 7(a). For constant pressure varied preheat temperature, all the conditions show similar results as shown in Fig. 7(b).

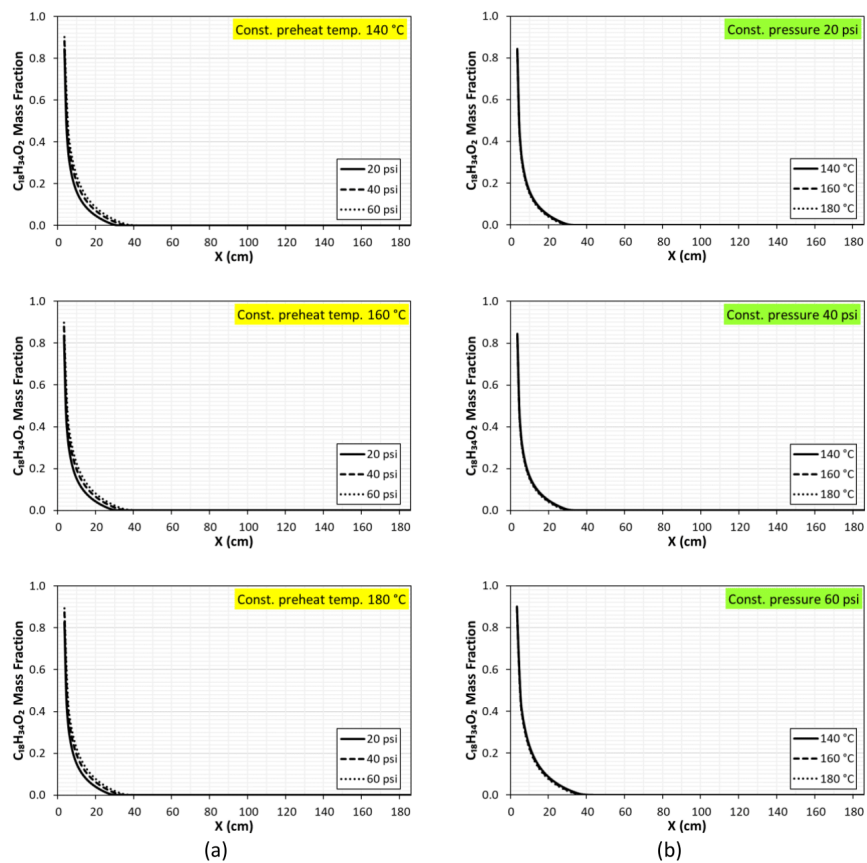
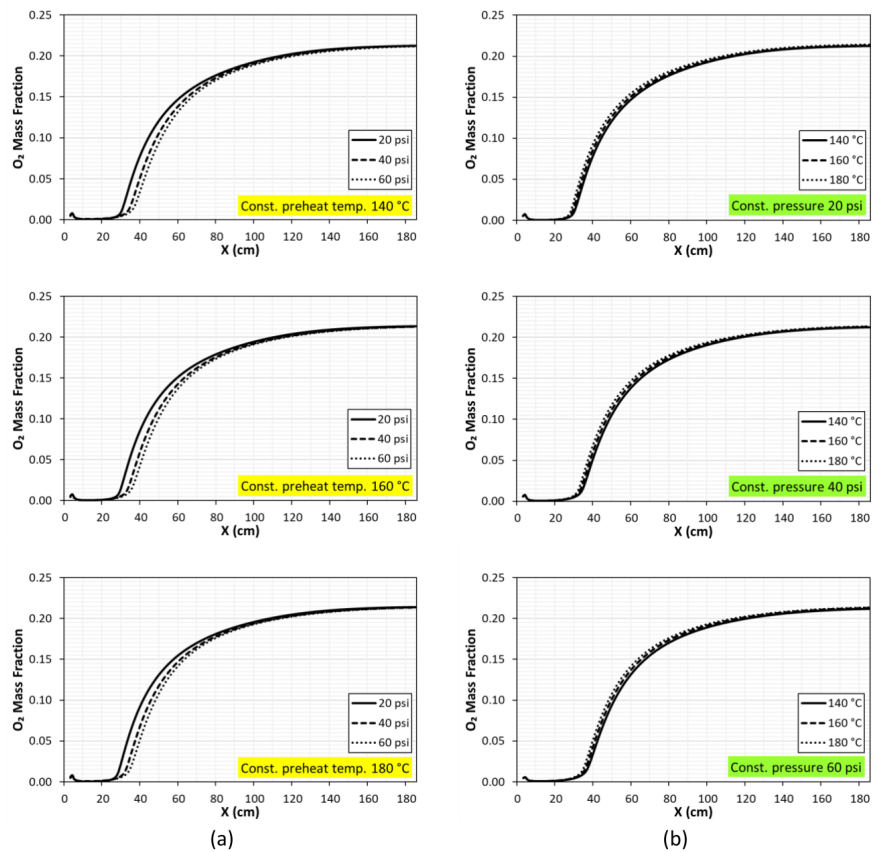


Fig. 7 Palm oil mass fraction along a combustion chamber length (a) constant preheat temperature varied pressure, (b) constant pressure varied preheat temperature (CFD results)

### 3.2.3 O<sub>2</sub> mass fraction

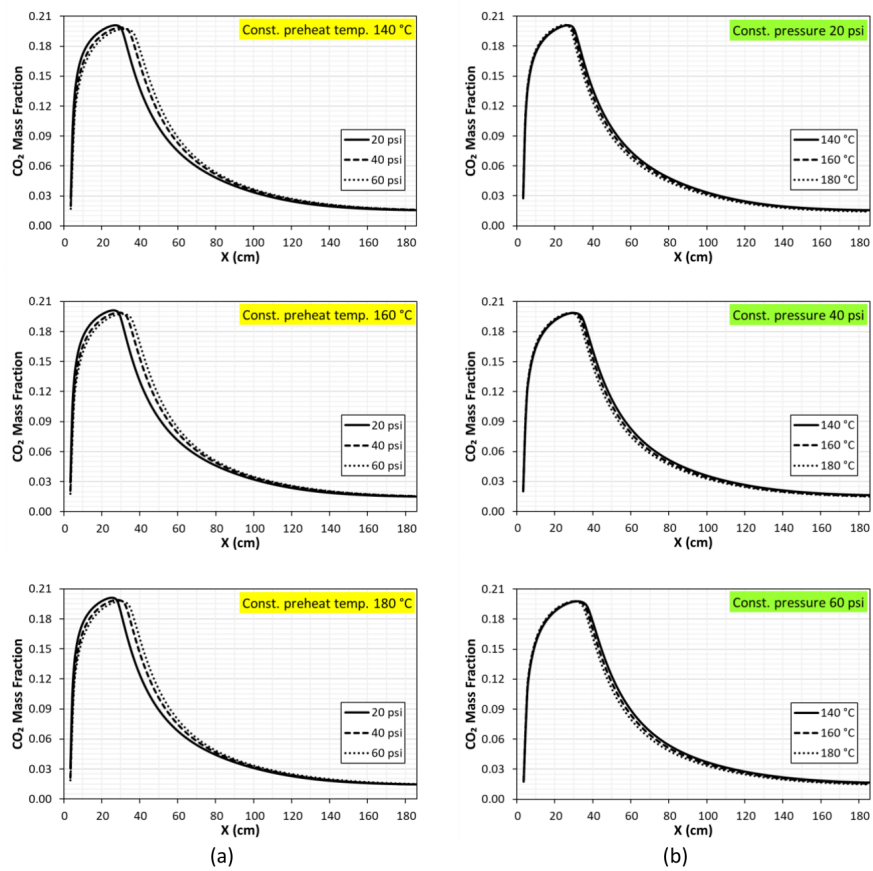
Considering Fig. 8, O<sub>2</sub> is also a reactant that is used in combustion reaction. When combustion reaction occurs, O<sub>2</sub> mass fraction increases slightly due to excess air in a chamber. Then, O<sub>2</sub> mass fraction rises rapidly at a chamber length 25-35 cm because there is not enough palm oil. So, the air that enters a chamber is excess air.



**Fig. 8** O<sub>2</sub> mass fraction along a combustion chamber length (a) constant preheat temperature varied pressure, (b) constant pressure varied preheat temperature (CFD results)

### 3.2.4 CO<sub>2</sub> mass fraction

Considering Fig. 9, CO<sub>2</sub> mass fraction increases rapidly at a chamber length from an inlet to 30 cm because C is converted into CO<sub>2</sub> and CO. An increase in CO<sub>2</sub> shows better combustion and lower CO. Then, CO<sub>2</sub> mass fraction starts to fall at a chamber length 30-35 cm due to no combustion reaction. Referring to Fig. 7 palm oil mass fraction becomes 0 at 25-35 cm. So, there is no reactant to continue combustion reaction.



**Fig. 9** CO<sub>2</sub> mass fraction along a combustion chamber length (a) constant preheat temperature varied pressure, (b) constant pressure varied preheat temperature (CFD results)

### 3.2.5 Experimental and numerical comparisons

Considering experimental and numerical results of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in case of varied preheat temperatures with constant air pressure, both results show same graph trend which percent of O<sub>2</sub> tends to decrease but CO<sub>2</sub> increases as shown in Fig. 10(a) and 10(b) respectively.

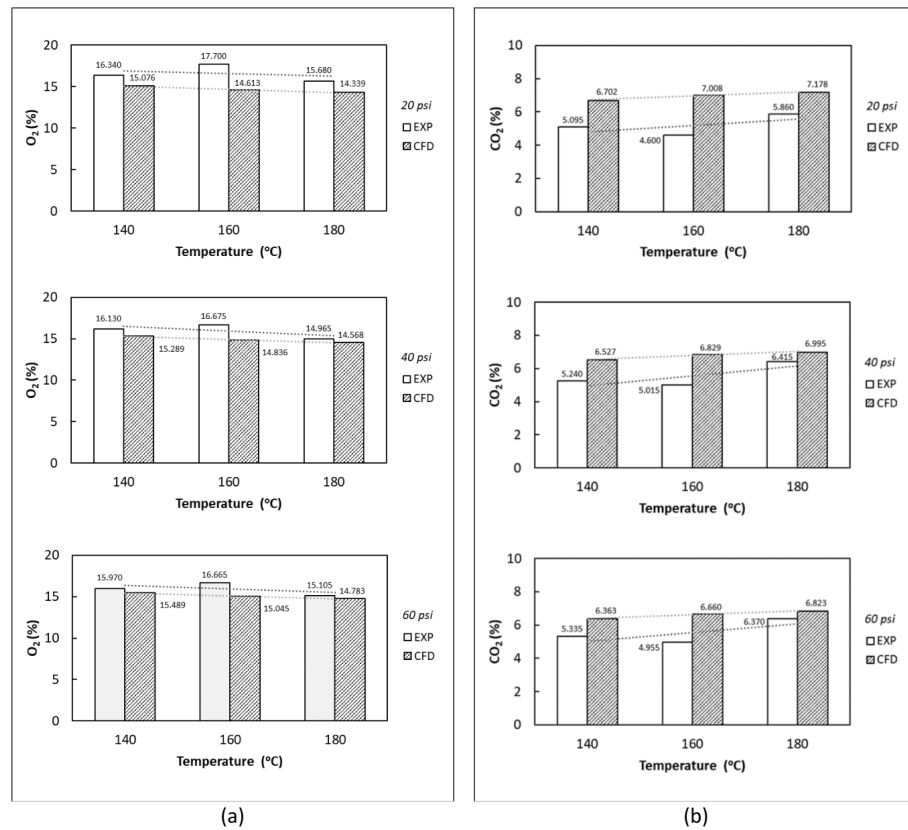


Fig. 10 Experimental and numerical comparisons (a) O<sub>2</sub>, (b) CO<sub>2</sub>

## 4. Conclusion

The purpose of this study is to investigate experimental and numerical study of palm oil-air combustion. Chemical formula and properties of oleic acid were used since it is the main content in palm oil. Experimental and numerical results show great agreement that high preheat temperature and air pressure can accelerate palm oil-air combustion. Fuel with high preheat temperature can ignite easier compared to lower preheat temperature. High temperature fuel combined with high air pressure results in high flame temperature, large flame size and long flame penetration. For

emissions released from combustion, CO and NO<sub>x</sub> tend to decrease when preheat temperature and air pressure are high.

#### Acknowledgement

This work was financially supported by the Research and Development Office (RDO) of Prince of Songkla University (PSU).

#### References

- [1] Hannah Ritchie, Max Roser, "Renewable Energy" 2020. [online] Available: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>.
- [2] Omer, Abdeen Mustafa. "Energy use and environmental impacts: A general review." *Journal of renewable and Sustainable Energy* 1, no. 5 (2009): 053101. <https://doi.org/10.1063/1.3220701>
- [3] Organization for Economic Cooperation and Development, "OECD Green Growth Studies: Energy" 2012.
- [4] Hannah Ritchie, Max Roser. "Fossil Fuels" 2020.
- [5] Dilip Ahuja, Marika Tatsutani, Daniel Schaffer, "Sustainable energy for developing countries" 2009.
- [6] U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (FEMP), "Biomass for Electricity Generation" 2016.
- [7] Eia. "Biomass-renewable energy from plants and animals" 2020.
- [8] BioEnergy Consult, "Importance of Biomass Energy" 2020.
- [9] Hashimoto, Nozomu, Hiroyuki Nishida, Masayoshi Kimoto, Kazuki Tainaka, Atsushi Ikeda, and Satoshi Umemoto. "Effects of *Jatropha* oil blending with C-heavy oil on soot emissions and heat absorption balance characteristics for boiler combustion." *Renewable Energy* 126 (2018): 924-932. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.018>
- [10] Mahfouz, Ahmed, Ahmed Emara, M. S. Gad, and Ahmed El Fatih. "Effect of waste cooking-diesel oils blends on performance, emissions and combustion characteristics of industrial oil burner." *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol* 5 (2017): 1264-1274. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.9182>
- [11] Zuber, Muhammad Ahmar, Ahmad Muhsin Ithnin, Wira Jazair Yahya, Ahmad Danish Abd Wahab, and Mohamad Azrin Ahmad. "Performance of sludge palm oil combustion using waste oil burner." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 49, no. 1 (2018): 55-61.
- [12] Phusadee Arunmas, Yuthana Praiwan, Pitsinee Jitpleecheep, "Palming off the problem" 2019.
- [13] Alimalbari, Ameen, Sherly Hanifarianty, Anil Kumar, Thanet Khomphet, Theera Eksomtramage, and Makatar Waehayee. "Effects of pressed palm conditions on acceleration of palm drying rate and CPO quality." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 55, no. 1 (2019): 12-19.
- [14] Husin, Akmal Hakim, Syahmil Hakim Hamzani, Shahrin Hisham Amirnordin, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Rafiuddin Wahidon, and Makatar Wae-hayee. "Drying Studies of Oil Palm Decanter Cake for Production of Green Fertilizer." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 97, no. 2 (2022): 66-79. <https://doi.org/10.37934/arfmts.97.2.6679>
- [15] Pakdeechot, Siravit, Makatar Wae-hayee, and Sherly Hanifarianty. "Effects of Sterilization Times of Palm Bunches on Fruit-Bunch Separation, Crude Palm Oil Yield and Quality Using Direct Steaming." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 82, no. 2 (2021): 39-46. <https://doi.org/10.37934/arfmts.82.2.3946>
- [16] United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service, "data&analysis" 2019.
- [17] Minchul, Suh. "World Palm Oil Supply Forecast", *Oil Palm Industry Economic Journal* 20, (2020): 21-27.
- [18] Prapasongsa, Trakarn, Charongpun Musikavong, and Shabbir H. Gheewala. "Life cycle assessment of palm biodiesel production in Thailand: impacts from modelling choices, co-product utilisation, improvement technologies, and land use change." *Journal of Cleaner Production* 153 (2017): 435-447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.130>
- [19] Nilnet Jankaew, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Maizirwan Mel and Makatar Wae-hayee. "The Effects of Pressure and Temperature on Flame Characteristics of Crude Palm Oil



- Combustion." Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 98, Issue 2 (2022): 165-174. <https://doi.org/10.37934/arfmts.98.2.165174>
- [20] Papanee Muanruksa, Phavit Wongsirichot, James Winterburn and Pakawadee Kaewkannetra. "Integrated Cleaner Biocatalytic Process for Biodiesel Production from Crude Palm Oil Comparing to Refined Palm Oil." Catalysts, no. 11 (2021): 734. <https://doi.org/10.3390/catal11060734>
- [21] Chempro "Technical Information Palm Oil Properties".



