

การศึกษาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระและสิ่งเจือปนในน้ำมันปาล์ม
เพื่อพัฒนาสู่การนำไปใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระและสิ่งเจือปนในน้ำมันปาล์ม
เพื่อพัฒนาสู่การนำไปใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF REMOVAL METHOD OF FREE FATTY ACID AND IMPURITY
IN PALM OIL FOR BIO-TRANSFORMER



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระและสิ่งเจือปนในน้ำมัน
ปาล์มเพื่อพัฒนาสู่การนำไปใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ

โดย

นายชนภัทร เลิศวีรนนทรรัตน์

นายณัฐพงศ์ มานตรี

นายฟาอิซ ภูเงิน

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.นริศรา ทองบุญชู

ปริญญาานิพนธ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ดร.นริศรา ทองบุญชู)

กรรมการ

(ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

กรรมการ

(รศ.ดร.กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระและสิ่งเจือปนในน้ำมัน
ปาล์มเพื่อพัฒนาสู่การนำไปใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ

โดย นายชนภัทร เลิศวีรนนทรรัตน์
นายณัฐพงศ์ มานตรี
นายฟาอิช ภูเงิน

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.นริศรา ทองบุญชู

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงด้วยวิธีการดูดซับ โดยตัวดูดซับที่นำมาใช้ศึกษาคือ ซิลิกาอสัณฐานแบบไฮโดรเจล และทำการทดลองโดยการแปรเปลี่ยนสภาวะต่างๆ ได้แก่ การปรับปรุงตัวดูดซับ ชนิดของตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิ และเวลาในการดูดซับ ได้ศึกษาจุลศาสตร์ และสมดุลการดูดซับ สามารถสร้างสมการเพื่อประมาณการปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ที่อุณหภูมิต่างๆได้ และพบว่าต้องใช้ตัวดูดซับปริมาณ 3 กรัมต่อน้ำมัน 100 กรัม ในการกำจัดกรดไขมันอิสระที่มีค่าเริ่มต้น 691 จนเหลือ 44 ppm โดยทำที่อุณหภูมิห้อง(30 องศาเซลเซียส) และเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที บรรลุเป้าหมายที่ต้องการให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงต่ำกว่า 50 ppm การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันแต่ละชนิดทั้งก่อน และหลังการดูดซับ โดยใช้เทคนิค HPLC แสดงให้เห็นว่ากรดไขมันอิสระแต่ละประเภท ได้แก่ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และกรดอีโคซาดีโนอิก มีการลดลงอย่างชัดเจน และตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระแต่ละชนิดใกล้เคียงกัน การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มก่อนและหลังการดูดซับพบว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการดูดซับนั้นมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่ระยะห่างในการทดสอบ 2 มิลลิเมตร เท่ากับ 50 kV และ 61.3 kV ตามลำดับ และที่ระยะห่างทดสอบ 1 มิลลิเมตร จะมีค่าเท่ากับ 32.6 kV และ 37.3 kV ตามลำดับ แสดงว่าการลด FFA มีผลทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น ค่าที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้การใช้งานน้ำมันปาล์มในการเป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงนั้นมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยที่มากยิ่งขึ้น

Thesis	Study of Removal Method of Free Fatty Acid and Impurity In Palm Oil for Bio-Transformer Oil Application
Student	Mr. Chanaphat Lertweeranontharat Mr. Nattapong Mantree Mr. Fariz Phoongen
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Dr. Narisara Thongboonchoo

ABSTRACT

This research aims to study the removal of free fatty acids (FFA) in palm oil to make it suitable for use as transformer oil using the adsorption method. The adsorbent used in this study is hydrogels of amorphous silica. The experiments were conducted by varying the following conditions: adsorbent modification, adsorbent type, adsorbent dosage, temperature, and adsorption time. The adsorption kinetics and equilibrium were studied. The equation for estimating the required amount of adsorbent at different temperatures was developed. It was found that 3 grams of adsorbent per 100 grams of oil were required to reduce the FFA content from 691 to 44 ppm at room temperature (30°C) and an adsorption time of 1 hour and 30 minutes. This achieved the desired target of reducing the FFA content to below 50 ppm. The analysis of the chemical composition of each fatty acid before and after adsorption using the HPLC technique showed that each type of FFA, including palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid, and eicosanoic acid, was significantly reduced. The adsorbent was equally effective in removing each type of FFA. The electrical properties of palm oil before and after adsorption were tested. It was found that the palm oil after adsorption had a breakdown voltage of 50 kV and 61.3 kV at a test gap of 2 mm, and 32.6 kV and 37.3 kV at a test gap of 1 mm, respectively. This shows that the reduction in FFA resulted in an increase in the breakdown voltage. This increase makes the use of palm oil as a liquid insulation in transformers more efficient and safer.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา และ ดร.นริศรา ทองบุญชู ที่กรุณาให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาด มอบความรู้และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นเรศรชฎ วัฒนเดช นายศักดา มณีโรจน์ นายโกมินทร์ ชุมพิบูลย์ และ นายเพชร ทองคง ตลอดจนบุคลากร และห้องปฏิบัติการไฟฟ้าของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

ขอขอบพระคุณ คุณศุภชัย จินตนาเลิศ คุณศิริลักษณ์ พลดารา และคุณวันทนา รัตนพิมพ์ ตลอดจนบุคลากรบริษัทสุขสมบูรณ์ น้ำมันปาล์มจำกัด ที่สนับสนุน และให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบริษัท Biz Bees และบริษัท GRACE ผู้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้ความสนับสนุนด้านการอำนวยความสะดวกโดยเสมอมา

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่มากก็น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคุณอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและขอแสดงความกตัญญูตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	3
2.2 คุณสมบัติของฉนวนเหลว.....	4
2.3 ชนิดของฉนวนเหลว.....	5
2.4 ปฏิกิริยาเคมีภายในหม้อแปลง (Chemical Reaction).....	6
2.5 การกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม.....	10
2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process).....	11
2.7 สารดูดซับ (Adsorbents).....	13
2.8 การกระตุ้นตัวดูดซับ (Activated Adsorbent).....	15
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	19
3.1 การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม.....	19
3.2 การศึกษาอายุของน้ำมันปาล์มต่อการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระ.....	20
3.3 การศึกษาตัวดูดซับและสภาวะสำหรับการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม.....	20

3.4 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ และสมดุลของการดูดซับ.....	23
3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม.....	24
3.6 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มเพื่อพัฒนาสู่น้ำมันหม้อแปลง.....	25
3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	26
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันปาล์มหลังกระบวนการดูดซับ	26
4.2 ผลการวิเคราะห์กระบวนการดูดซับ.....	28
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติ และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม.....	31
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผลการศึกษา	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
บรรณานุกรม.....	36
ภาคผนวก	39
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	40
ภาคผนวก ข การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์ม.....	45
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ.....	51
ภาคผนวก ง มาตรฐานสำหรับเอสเทอร์ธรรมชาติที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกลีเซอรอล โมโน- ได- และไตรกลีเซอรั	6
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า	6
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยา Esterification	7
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยา Transesterification.....	7
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อโครงสร้างของเซลลูโลส	8
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยา Thermal Pyrolysis	8
รูปที่ 2.8 ภาพกระบวนการ Hydrolysis ในน้ำมัน	9
รูปที่ 2.9 กระบวนการ Hydrolysis ในฉนวนกระดาษเซลลูโลส.....	9
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยา Saponification กับกรดไขมันอิสระ	10
รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยา Saponification กับ Triglyceride	11
รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมโดยทั่วไปของกระบวนการดูดซับ	12
รูปที่ 3.1 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนั.....	25
รูปที่ 4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตามอายุการเก็บ	26
รูปที่ 4.2 จลศาสตร์ของการดูดซับ.....	28
รูปที่ 4.3 ไอโซเทอรัที่อุณหภูมิ 30 °C, 60 °C และ 90 °C	29
รูปที่ 4.4 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระระหว่างก่อนและหลังการดูดซับ.....	32
รูปที่ 4.5 ร้อยละการถูกดูดซับของกรดไขมันอิสระแต่ละชนิด	32

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงคุณลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ	20
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเงื่อนไขของตัวดูดซับซิลิกาไฮโดรเจล และการกำจัดความชื้นในน้ำมัน	21
ตารางที่ 3.3 ตารางการทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระ	23
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันอิสระของตัวดูดซับแต่ละชนิด	27
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุง	28
ตารางที่ 4.3 เส้นแนวโน้ม ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ และค่าคงที่ q_0K_L	30
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์สำหรับการประมาณหาปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะต่างๆ	30
ตารางที่ 4.5 ปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิต่างๆ	31
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มก่อน และหลังจากการดูดซับ	33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

หม้อแปลงไฟฟ้าหรือหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบเครือข่ายไฟฟ้าแรงสูง ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงล้วนส่งผลกระทบต่อระบบเครือข่ายไฟฟ้าทั้งหมด ส่วนสำคัญภายในหม้อแปลงประกอบด้วย ขดลวดตัวนำ แกนเหล็ก ฉนวนแข็ง และฉนวนเหลว สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายของหม้อแปลงคือ การเสื่อมประสิทธิภาพของระบบฉนวนภายในหม้อแปลง [1] ซึ่งส่งผลให้เกิดการลัดวงจรและนำไปสู่ความเสียหายร้ายแรงของหม้อแปลงในที่สุด ดังนั้นตัวกำหนดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า จึงขึ้นกับการพัฒนาวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนภายในหม้อแปลง [2-3]

น้ำมันแร่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งจากการกลั่นปิโตรเลียมได้ถูกใช้เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงมาอย่างยาวนาน มีข้อเสียในการใช้งานในแง่ของความสามารถในการทนทานต่อความร้อนที่ต่ำ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากนโยบายของรัฐบาลในหลายประเทศที่พยายามผลักดันให้ใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทนน้ำมันแร่ จึงมีการศึกษาถึงศักยภาพของวัสดุทางเลือกต่างๆที่สามารถทดแทนการใช้น้ำมันแร่ได้ เช่น เอสเทอร์ธรรมชาติ (Natural ester) ชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันคาโนลา น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และยังมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของความทนทานต่อความร้อนซึ่งสูงกว่าน้ำมันแร่ถึงสองเท่า ข้อดีในส่วนนี้จะช่วยลดอัตราการเกิดไฟไหม้และการระเบิดของหม้อแปลงได้ อย่างไรก็ตามน้ำมันปาล์มยังคงมีข้อเสียสำคัญในแง่ของอายุการใช้งาน น้ำมันปาล์มจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับฉนวนเหลวชนิดอื่นที่ใช้ในหม้อแปลง หากไม่ได้มีการปรับสภาพน้ำมันก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งส่งผลให้ฉนวนแข็งภายในระบบเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วอีกด้วย อันเนื่องมาจากสภาวะการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูง และศักย์ไฟฟ้าที่สูงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในระบบ นอกจากนี้กรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่สูงอาจส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาเคมีในลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันปาล์มเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นฉนวนเหลวสำหรับหม้อแปลงมากยิ่งขึ้น จึงมุ่งเน้นที่การลดปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันปาล์ม [4-5]

ในปัจจุบันแนวโน้มความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการพัฒนาวัสดุฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงอันเป็นส่วนสำคัญของระบบไฟฟ้า จึงมีศักยภาพในแง่ของเศรษฐศาสตร์เป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นการเพิ่มทั้งมูลค่า และพื้นที่ทางการตลาดให้กับผลผลิตของเกษตรกรไทย ซึ่งจะส่งผลต่อเศรษฐกิจและการเติบโตของประเทศ [3-6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาวิธีการ และสภาวะในการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มให้มีค่าเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มหลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาเพื่อหาวิธีการและเทคนิคที่เหมาะสมในการกำจัดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์ม เช่น การดูดซับและการใช้สารเคมีในการกำจัด
2. ออกแบบและทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระที่เลือกและตัวดูดซับ
3. ศึกษาตัวดูดซับชนิดต่างๆและสภาวะที่มีผลต่อการกำจัดกรดไขมันได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และปริมาณของสารดูดซับ
4. วิเคราะห์คุณภาพและคุณลักษณะของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ก่อนและหลังการกำจัดกรดไขมันอิสระ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสภาวะ และเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มให้ต่ำกว่า 50 ppm
2. มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบฉนวนเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้า
3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำมันปาล์มในการพัฒนาสู่น้ำมันหม้อแปลง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของหม้อแปลง น้ำมันปาล์ม และผลจากการดัดไขมันอิสระในระหว่างการทำงานของหม้อแปลง พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเหลว และการดูดซับซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระ

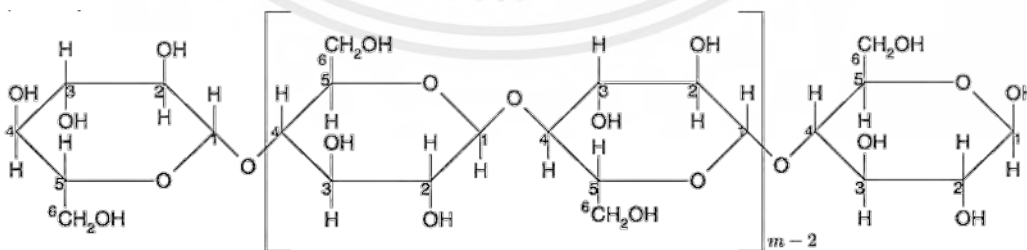
2.1 ระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไป ระบบฉนวนภายในหม้อแปลงจะถูกแบ่งเป็นสองชนิด คือฉนวนแข็ง และฉนวนเหลวหรือน้ำมันหม้อแปลง

2.1.1 ฉนวนแข็ง [7]

ฉนวนแข็งทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการรับแรงกลไดนามิกที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปฉนวนแข็งที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าคือกระดาษอัดแรง (Press Board)

กระดาษอัดแรงเป็นวัสดุที่ได้มาจากการอัดกระดาษหลายชั้นด้วยแรงดัน ดังนั้นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกระดาษอัดแรงจึงเป็นเส้นใยเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีสมบัติที่ดีในด้านความเป็นฉนวน และยังสามารถรับแรงกลได้มาก ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปในฉนวนกระดาษในหม้อแปลงก่อนการใช้งานเส้นใยเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยหน่วยย่อยประมาณ 1,000 ถึง 1,200 โมเลกุล [5] เมื่อผ่านการใช้งาน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงส่งผลให้เซลลูโลสเกิดการสลายตัวเป็นสายโซ่ที่เล็กลง และส่งผลให้ฉนวนสูญเสียสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ฉนวนเหลว [2]

ฉนวนเหลวหรือที่นิยมเรียกว่าน้ำมันหม้อแปลงมีหน้าที่หลัก คือการเป็นฉนวนไฟฟ้า และเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนจากหม้อแปลงออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนเหลวจึงต้องมีคุณสมบัติที่สามารถต้านทานแรงดันไฟฟ้าได้สูง ปลอดภัยจากอัคคีภัย และทนทานต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานของหม้อแปลง

ฉนวนเหลวที่นิยมใช้ในอดีต คือ น้ำมันแร่ แต่มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ได้แก่ จุดติดไฟและจุดวาบไฟต่ำ ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อายุการใช้งานที่สั้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาฉนวนเหลวชีวภาพขึ้น เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาด้านความปลอดภัย และด้านสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ฉนวนเหลวชีวภาพยังสามารถยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลง มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ ฉนวนชีวภาพที่นิยมใช้กันได้แก่ น้ำมันพืชซึ่งเป็นเอสเทอร์ธรรมชาติ

2.2 คุณสมบัติของฉนวนเหลว [2]

คุณสมบัติของฉนวนเหลว สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเป็นฉนวน ความคงทนต่อสภาพแวดล้อมในการดำเนินงาน และสามารถประเมินอายุการใช้งานเบื้องต้นในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ การทดสอบคุณสมบัติของฉนวนเหลวที่สำคัญสำหรับการใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงมีดังนี้

2.2.1 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ (Breakdown Voltage)

ค่าความคงทนต่อแรงดัน เป็นความสามารถของฉนวนในการทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าและเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการเป็นฉนวนไฟฟ้า การวัดแรงดันเบรกดาวน์ตามมาตรฐาน ASTM D1816 เริ่มด้วยการใช้ชุดวัด โดยมีขั้นตอนคือหย่อนขั้วโลหะหนึ่งคู่ และตรึงตัวลงในน้ำมันโดยมีระยะห่าง 1-2 มิลลิเมตร จากนั้นเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆจนเกิดประกายไฟระหว่างขั้วโลหะ บันทึกผลแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดประกายไฟ กระบวนการนี้ต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของการวัดเพื่อความแม่นยำ

2.2.2 ความชื้น (Moisture and Volatile matter)

ความชื้นในน้ำมันของหม้อแปลงมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันและส่งผลให้ให้ฉนวนกระดาษในหม้อแปลงสลายตัว โดยทั่วไปความชื้นในน้ำมันจะแสดงในรูปของส่วนในล้าน (ppm)

สำหรับน้ำมันหม้อแปลงควรมีระดับความชื้นต่ำกว่า 50 ppm ตามมาตรฐาน IS-335(1993) ซึ่งการวัดระดับความชื้นในระดับนี้สามารถทำได้โดยเครื่องมือเครื่องวัด เช่น Coulometric Karl Fischer Titrator

2.2.3 ความเป็นกรด

กรดเป็นคุณสมบัติที่เป็นอันตรายต่อน้ำมันหม้อแปลง หากน้ำมันมีสภาพเป็นกรด ปริมาณน้ำที่ละลายในน้ำมันก็จะละลายได้มากขึ้น และส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเกิดได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้ความเป็นกรดของน้ำมันยังส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของฉนวนกระดาษลดลง และสามารถส่งผลต่อการการเกิดสนิมของโครงสร้างที่เป็นโลหะเมื่อมีความชื้น ในปัจจุบันมีวิธีการลดปริมาณกรดเริ่มต้นในน้ำมันหม้อแปลง และการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ (Free radical) เพื่อยับยั้ง หรือลดการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้เกิดกรด และความเสียหายต่อระบบฉนวนได้

การทดสอบความเป็นกรดของน้ำมันหม้อแปลง สามารถใช้วัดองค์ประกอบที่เป็นกรดของสารปนเปื้อนได้ โดยค่าความเป็นกรดแสดงเป็นหน่วยมิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้กรดที่มีอยู่ในน้ำมันหนึ่งกรัมกลายเป็นกลาง (mg KOH/g Oil)

2.3 ชนิดของฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวที่นิยมใช้ในน้ำมันหม้อแปลงมีหลากหลายชนิด ได้แก่ น้ำมันแร่ และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น

2.3.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอันเป็นผลิตภัณฑ์จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งในผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการดังกล่าว น้ำมันแร่นั้นเป็นส่วนที่มีราคาค่อนข้างต่ำ แต่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำมาเป็นฉนวนเหลว ทำให้น้ำมันแร่เป็นวัสดุที่ถูกใช้มาอย่างยาวนาน

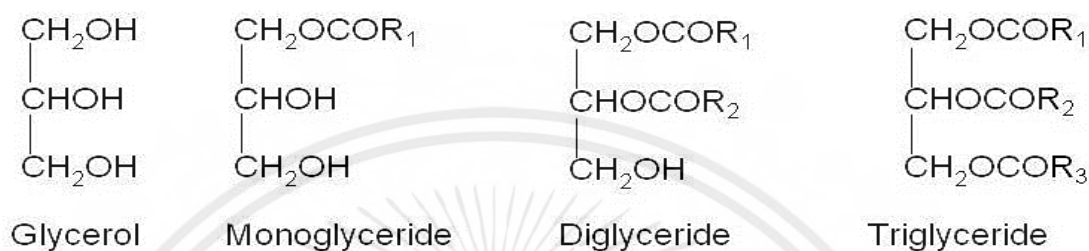
ลักษณะทั่วไปของน้ำมันแร่ เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีสมบัติทางกายภาพขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวจำพวกสารพาราฟิน ไอโซพาราฟิน แนฟทา และมีโมเลกุลที่มีขั้วเล็กน้อย ได้แก่ กรด และคีโตน ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามอายุการใช้งาน

น้ำมันแร่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ค่อนข้างเสถียร ทำให้มีคุณสมบัติในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ยากในระหว่างการทำงานของหม้อแปลง ส่วนโครงสร้างโมเลกุลเชิงขั้วที่กล่าวมาข้างต้นก็ส่งผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆในการทดสอบทางไฟฟ้าเช่นกัน

2.3.2 น้ำมันปาล์ม [8]

น้ำมันปาล์มจัดเป็นเอสเทอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งซึ่งอยู่ในรูปของกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างกลีเซอรอลและกรดไขมัน ทั้งนี้อาจอยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือโมโนกลีเซอไรด์ขึ้นอยู่กับจำนวนกรดไขมันที่สร้างพันธะกับกลีเซอรอลดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยน้ำมันปาล์มสำหรับบริโภคทั่วไปจะมีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์เป็นหลักคิดเป็น 95% โดยน้ำหนัก

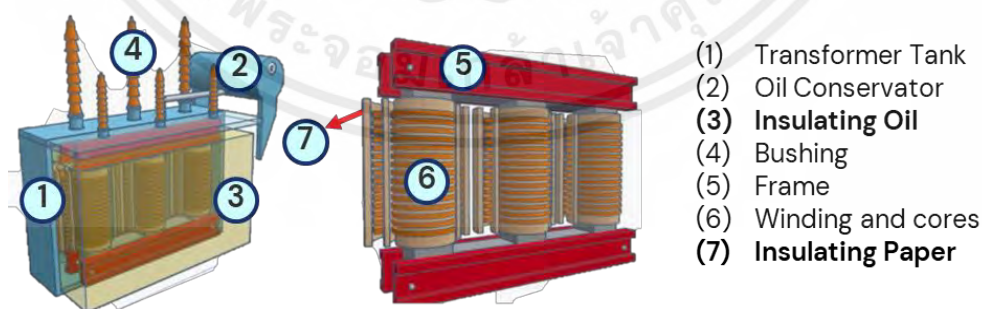
กรดไขมันที่ไม่สร้างพันธะกับกลีเซอรอลจะอยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลให้น้ำมันปาล์มมีความเป็นกรด ซึ่งกรดไขมันที่พบในน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่จะประกอบด้วย กรดปาล์มมิติกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลอยู่ร้อยละ 44.0 กรดโอเลอิก และกรดลิโนเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล 1 และ 2 ตำแหน่งตามลำดับอยู่ร้อยละ 39.2 และ 10.1 ตามลำดับ ที่บริเวณพันธะคู่นี้จะเป็นจุดที่ง่ายต่อการถูกออกซิไดซ์และแตกตัวไปอยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระได้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกลีเซอรอล โมโน- ได- และไตรกลีเซอรัล

2.4 ปฏิกริยาเคมีภายในหม้อแปลง (Chemical Reaction) [2-3]

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ขวดลวด ฉนวนของแข็ง และฉนวนของเหลว แสดงดังรูปที่ 2.3 ในระหว่างการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งกายภาพ และเคมี เกิดขึ้นกับฉนวนทั้งสองประเภท โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนแบบเรดิคัล (Free Radical) ที่เกิดจากการถูกกระตุ้นด้วยสภาวะแรงดันไฟฟ้าแรงสูง เกิดเป็นวัฏจักรการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและพลังงาน ซึ่งผลิตภัณฑ์ของการถูกกระตุ้นจะแสดงผลให้เห็นจากอุณหภูมิ ปริมาณกรดสารประกอบฟูราน และก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมัน ปฏิกริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้ในหม้อแปลงมีรายละเอียดดังนี้



- (1) Transformer Tank
- (2) Oil Conservator
- (3) Insulating Oil
- (4) Bushing
- (5) Frame
- (6) Winding and cores
- (7) Insulating Paper

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า[26]

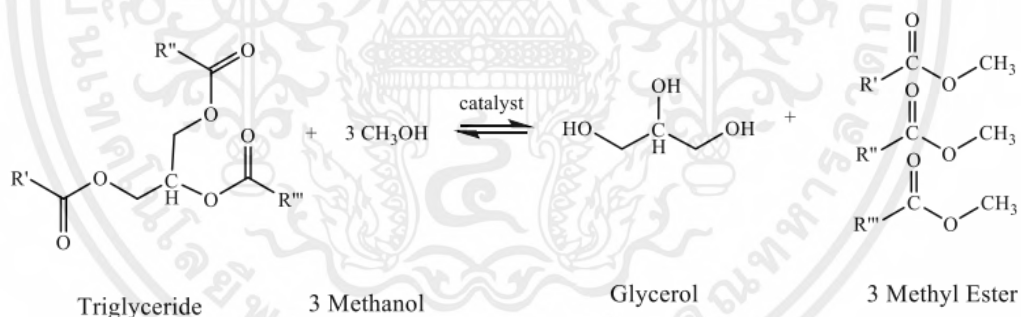
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ปฏิกิริยา Esterification and Transesterification [2]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับเอสเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นฐาน ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในกรณีที่ระบบไม่มีน้ำโดยสมบูรณ์ แอลกอฮอล์จะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระเกิดเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน เรียกว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน แอลกอฮอล์จะรวมตัวกับโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้โมเลกุลของกรดไขมันหลุดออกได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอล และเมทิลเอสเทอร์ จากนั้นกลีเซอรอลจะถูกกำจัดออกผ่านกระบวนการแยกโดยอาศัยความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะช่วยลดความหนืดของน้ำมัน ทำให้มีลักษณะคล้ายกับน้ำมันดีเซล (Methyl Ester) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยา Esterification



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยา Transesterification

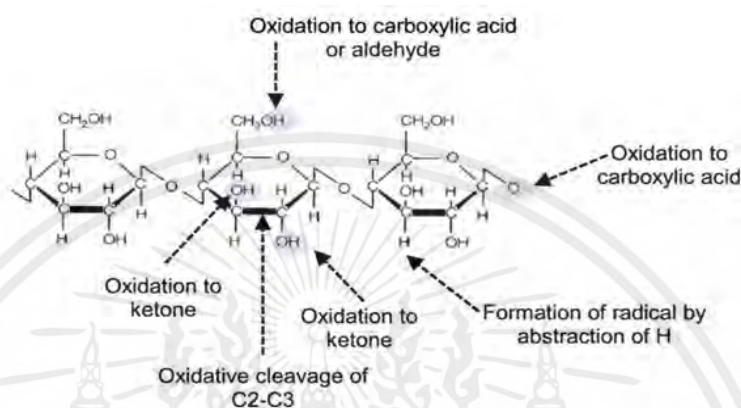
2.4.2 Oxidation และ Reduction [5-9]

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (reduction) เป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่งผลให้เลขออกซิเดชันของโมเลกุลรวมของสารให้เป็นผู้ให้อิเล็กตรอนลดลง โดยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และเรียกสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนนี้ว่า ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent)

โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสประกอบไปด้วยโมเลกุลของกลูโคสที่มีกลุ่มของไฮดรอกซิล มาเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) การสูญเสียอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยา จึงมักเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นกับบริเวณกลุ่มของไฮดรอกซิล หรือก็คือทำให้เลขออกซิเดชันของโมเลกุลเพิ่มขึ้น โดยน้ำและกรดจะเป็นผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยา สำหรับ Primary Alcohol เมื่อเกิดออกซิเดชันครั้งแรกจะเกิดเป็นกลุ่มของแอลดีไฮด์ และเมื่อเกิดออกซิเดชันอีกครั้งจะเกิดเป็นกลุ่มคาร์บอกซิลิก ส่วน Secondary Alcohol เมื่อเกิดออกซิเดชันจะอยู่ในกลุ่มของคีโตน พฏิกิริยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อความแข็งแรงของฉนวนกระดาษ (ฉนวนแข็ง) การเกิดออกซิเดชันต่อโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อโครงสร้างของเซลลูโลส

2.4.3 ปฏิกิริยา Pyrolysis [5-9]

โมเลกุลของเซลลูโลส (ฉนวนแข็ง) ในหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกแตกสลายด้วยความร้อน โดยจะมีการแตกพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง หรือความแข็งแรงของฉนวนกระดาษลดลงนั่นเอง โดยกระดาษจะเริ่มสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 130 °C ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิส จะประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยา Thermal Pyrolysis

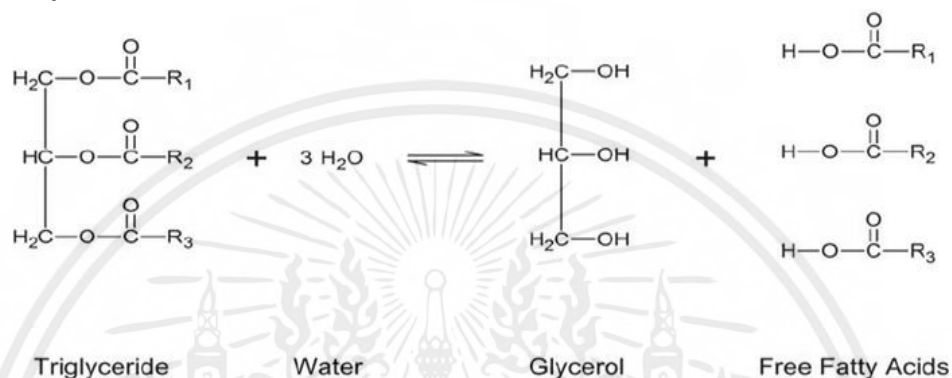
2.4.4 ปฏิกิริยา Hydrolysis [5-9]

ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) คือ ปฏิกิริยาที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะ ทำให้สารโมเลกุลใหญ่เกิดการแตกตัว เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน จะอยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ โดยไตรกลีเซอไรด์จะมีอัตราส่วนมากที่สุด (ประมาณ 95%) ซึ่งเป็นองค์ประกอบระหว่าง glycerol และ กรดไขมันอิสระ การมีน้ำในระบบส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ซึ่งสามารถเกิดกับโครงสร้างโมเลกุลทั้ง 3 ที่กล่าวมาข้างต้น โดยไฮโดรเจนไอออนจะเข้าไปแทนที่หมู่

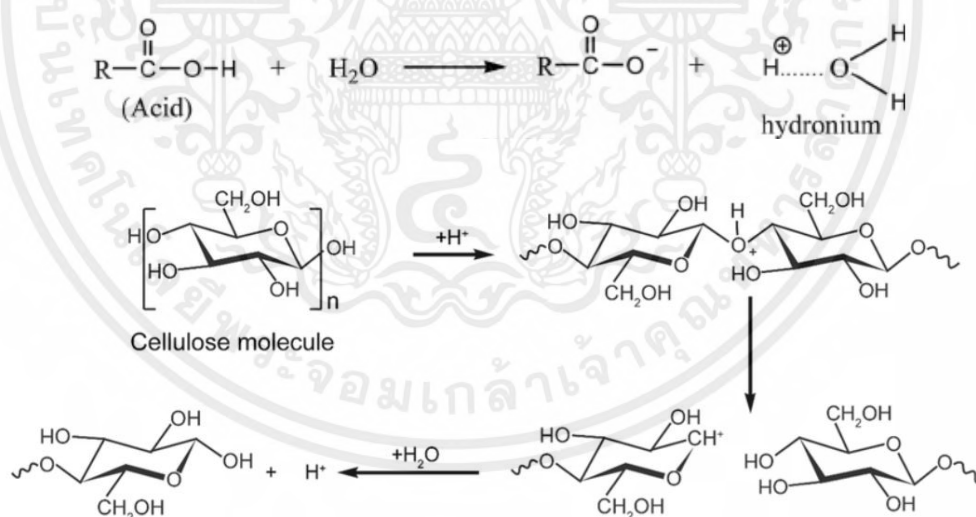
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลคิลในองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ ส่วนไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าไปจับกับหมู่ของแอลคิลที่หลุดออก เกิดเป็นกรดไขมันอิสระดังแสดงในรูปที่ 2.8

จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีน้ำและกรดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา โดยน้ำและกรดที่สะสมภายในหม้อแปลง จะส่งผลต่อห่วงโซ่โพลีเมอร์ของเซลลูโลสทำให้ห่วงโซ่แตกสลาย เกิดเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกลูโคส (Glucose) ซึ่งจะสลายตัวต่อไปเพื่อสร้างสารประกอบ พูราน และน้ำ จากนั้นโมเลกุลของน้ำก็จะเกิดการไฮโดรไลซิสต่อเป็นวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ภาพกระบวนการ Hydrolysis ในน้ำมัน



รูปที่ 2.9 กระบวนการ Hydrolysis ในฉนวนกระดาษเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม [10]

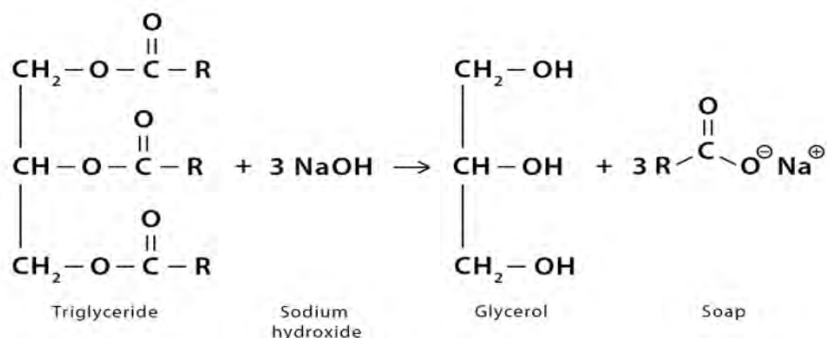
การลดปริมาณ หรือการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันปาล์มสามารถทำได้หลายวิธีเช่น กระบวนการทางเคมี (Chemical Process) และกระบวนการทางกายภาพ (Physical Process) วิธีการในการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันปาล์มแต่ละวิธีนั้นจะให้ผล และมีข้อจำกัดที่ต่างกัันออกไป การเลือกวิธีการในการกำจัดกรดไขมันอิสระจึงขึ้นอยู่กับเป้าหมายในการกำจัด และความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระเริ่มต้น ซึ่งวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันปาล์มประกอบด้วย การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การสกัดด้วยของตัวทำละลายของเหลว (Liquid-Liquid extraction) การกลั่นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ เป็นต้น

2.5.1 กระบวนการทำให้เป็นกลาง [11]

กระบวนการทำให้เป็นกลาง คือ กระบวนการปรับสภาพน้ำมันปาล์มให้มีปริมาณกรดเริ่มต้นลดลงก่อนเข้ากระบวนการทำให้บริสุทธิ์ โดยทั่วไปการปรับสภาพให้เป็นกลางสามารถทำได้ด้วยวิธีการสะเทิน หรือการล้างด้วยด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยโซเดียมไอออน หรือ โพแทสเซียมไอออน จะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) กับหมู่ไฮดรอกซิล ในโครงสร้างของกรดไขมันอิสระเกิดเป็นสบู่ และน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.10 แต่ในทางกลับกันหมู่ไฮดรอกซิลก็สามารถเข้าไปแทนที่หมู่แอลคิลในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ ได้กลีเซอรอล (Glycerol) ส่วนหมู่แอลคิลที่หลุดออกจะไปจับกับโซเดียมไอออน หรือ โพแทสเซียมไอออน เกิดเป็นเกลือสบู่ แสดงดังรูปที่ 2.11 เรียกปฏิกิริยาทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นว่า ซาปอนนิฟิเคชัน (Saponification reaction) ซึ่งส่งผลให้ความเป็นกรดลดลง แต่ก็เกิดการสูญเสียน้ำมันที่เป็นกลางด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยา Saponification กับกรดไขมันอิสระ



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยา Saponification กับ Triglyceride

2.5.2 การสกัดของเหลว-ของเหลว [12-14]

การสกัดของเหลว-ของเหลวเป็นกระบวนการแยกที่ใช้ความสามารถในการละลายสัมพัทธ์ของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผสมกันได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นจากกระบวนการกำจัดกรดไขมันด้วยวิธีทางเคมี เพื่อลดปริมาณการสูญเสียไขมันที่เป็นกลางเนื่องจากการเกิด Saponification และ Emulsification แต่ต้องใช้พลังงานมากกว่าเนื่องจากต้องมีกระบวนการที่ใช้แยกตัวทำละลายออก ซึ่งน้ำมันอาจมีสีที่เปลี่ยนแปลง และมีความเสถียรที่ลดลงเนื่องจากการเกิด Oxidation โดยสารละลายที่นำมาใช้มักเป็นสารที่มีขี้ผึ้ง ได้แก่ เอทานอล และน้ำ โดยทั่วไปเทคนิคนี้ใช้ตัวทำละลายที่มีเอทานอล 88.6% สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระจาก 5.8% เหลือ 0.3-0.4% โดยสูญเสียมวลน้ำมันที่เป็นกลาง 4.0%

2.5.3 กระบวนการกลั่นด้วยไอน้ำ [15]

การกลั่นน้ำมันปาล์มด้วยไอน้ำ เป็นกระบวนการกลั่นที่มีวัตถุประสงค์เพื่อสลายแคโรทีน(สารเม็ดสี) คีโตน แอลดีไฮด์ และกรดไขมันอิสระ อันเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่น และสีของน้ำมันที่เข้ม โดยสภาวะการทำงานของหอกลั่น จะทำงานที่สภาวะสุญญากาศ และอุณหภูมิสูงกว่า 210 °C เนื่องจากเป็นจุดที่แคโรทีนเริ่มสลายตัว และสภาวะสุญญากาศจะช่วยให้สารมีความสามารถในการกลายเป็นไอน้ำมากขึ้น

2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) [16]

การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าิยมใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนที่มีปริมาณน้อยออกจากสารละลาย โดยการใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก และมีสภาพขั้วบริเวณพื้นผิวที่เหมาะสมกับสิ่งเจือปนที่ต้องการดูดซับ

การดูดซับโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) โดยการดูดซับทางกายภาพจะอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ และไฟฟ้าสถิตระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกละลาย (Adsorbed) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดเมื่อมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาเคมีในการดูดซับ มักเกิดเมื่อมีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) และมีแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond)

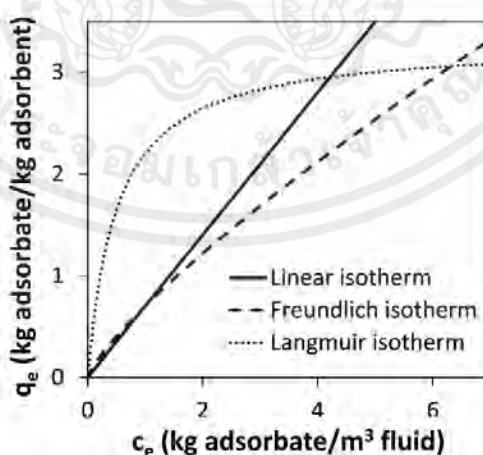
กระบวนการดูดซับจะเกิดจากการสะสมความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับโดยไม่มีการละลายเข้าด้วยกัน การแยกจะเกิดจากเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นจึงทำให้การดูดซับแตกต่างจากการดูดซึม ซึ่งใช้การถ่ายโอนโมเลกุลของสารจากวัฏภาคหนึ่งไปอยู่อีกวัฏภาคหนึ่งภายใต้สมดุลการละลาย

2.6.1 สมดุลการดูดซับ (Equilibrium adsorption) [20-21]

สมดุลการดูดซับคือสิ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหล กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง โดยสมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการถ่ายโอนสารในวัฏภาคของไหลไปยังตัวดูดซับ (Adsorption) มีค่าเท่ากับการถ่ายโอนสารที่อยู่ในตัวดูดซับไปยังวัฏภาคของไหล (Desorption) นั่นคืออัตราการดูดซับสุทธิเป็นศูนย์

2.6.2 เส้นไอโซเทอมของกระบวนการดูดซับ [16]

ข้อจำกัดในด้านปริมาณของการดูดซับที่สภาวะต่างๆถูกแสดงผ่านข้อมูลสมดุลของการดูดซับในลักษณะของเส้นไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับในสารละลายกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่สะสมในตัวถูกดูดซับ โดยแสดงเป็นค่าอัตราส่วนเปรียบเทียบกับปริมาณของสารในวัฏภาคนั้นๆ เส้นไอโซเทอมของการดูดซับจึงมีลักษณะได้หลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.12 รูปแบบที่แตกต่างกันของเส้นไอโซเทอมนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมในการดูดซับ อันเป็นผลจากปัจจัยต่างๆ เช่นวัฏภาคของสารละลาย(อาจอยู่ในวัฏภาคไอหรือของเหลว) แรงกระทำระหว่างโมเลกุลปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการดูดซับ(ในกรณีของการดูดซับทางเคมี) และอื่นๆ



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมโดยทั่วไปของกระบวนการดูดซับ [16]

รูปแบบหนึ่งของเส้นไอโซเทอมที่นิยมใช้ในการอธิบายสมดุลของการดูดซับทางกายภาพคือเส้นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ไอโซเทอรัมของการดูดซับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษากระบวนการดูดซับ โดยความสัมพันธ์ของไอโซเทอมนี้สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.1

$$q_e = \frac{q_0 K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} \quad (2.1)$$

- เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับ [mg of Adsorbate/g of Adsorbent]
 q_0 คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด [mg of Adsorbate/g of Adsorbent]
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล [mg/L]
 K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าค่าคงที่ในการดูดซับและปริมาณการดูดซับสูงสุดนั้นเป็นค่าคงที่ ดังนั้นในช่วงที่สารละลายมีความเข้มข้นต่ำ ผลคูณระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 0 จะทำให้พจน์ส่วนในสมการมีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นสมการที่ 2.1 จะอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงที่มีความชันเป็นผลคูณระหว่างค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดและค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์

ในทางกลับกันเมื่อระบบอยู่ในสภาวะที่ความเข้มข้นสูง ผลคูณระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่า 1 มากๆ ค่าปริมาณดูดซับจะเริ่มลู่เข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด

พฤติกรรมดังกล่าวนี้ส่งผลให้เส้นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นต่ำ และเมื่อถึงจุดหนึ่งจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.12

2.7 สารดูดซับ (Adsorbents)

สารที่มีความสามารถดูดซับสารชนิดอื่นไว้บริเวณพื้นผิว และในรูพรุน โดยทั่วไปมักมีสถานะเป็นของแข็ง มีพื้นที่ผิวสูง และมีรูพรุนภายในมาก

2.7.1 Graphitized Carbon Black

Graphitized carbons เป็นสารดูดซับที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นเนื้อเดียวกัน โดยไม่มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ภายใน สารดูดซับดังกล่าวจะดูดซับสารต่างๆบนผิวสัมผัสด้านนอกของตัวสารเท่านั้น การดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของโมเลกุล GCBs บริเวณผิวดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นแบบไม่มีขั้ว และมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในลักษณะเดียวกันกับ Graphite

2.7.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ เป็นรูปอสัณฐานของถ่านคาร์บอน (Amorphous carbon) คือมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นของแข็งประเภทไม่มีขั้วซึ่งมีความสามารถในการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์และกำจัดกลิ่นได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตมี 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือการ Carbonization เป็นการนำวัตถุดิบที่จะผลิต มาให้ความร้อนในสุญญากาศที่อุณหภูมิสูงประมาณ 400-900 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่นำมาสังเคราะห์ จะถูกไล่สารระเหยได้ออกจนหมด เหลือเพียงถ่านที่มีปริมาณร้อยละของคาร์บอนสูงขึ้น (ประมาณ 90%) ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นการ Activation คือการนำคาร์บอนที่ได้ในขั้นแรกมาเพิ่มพื้นที่ผิวโดยผ่าน ขบวนการกระตุ้น โดยใช้ น้ำ อากาศ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิสูงๆ เพื่อให้คาร์บอนเกิดรูพรุน มีพื้นที่ผิวหรือประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น รูพรุนเหล่านี้แบ่งได้ 2 ขนาด คือ รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) ถ้ามกัมมันต์ที่ผลิตเพื่อการค้าส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1,200 m²/g

ปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นจากการใช้ถ่านกัมมันต์ คือ ปัญหาในการวิเคราะห์ผล เนื่องจากพบว่า บางครั้งสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดสามารถสกัดออกจากตัวดูดซับได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจาก ความสามารถในการดูดซับแข็งแรงจึงยากแก่การสกัดออก นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์ยังมีโครงสร้างของ ผิวดูดซับที่ซับซ้อน และผิวสัมผัสที่มีลักษณะไม่เหมือนกันทั้งหมด (Heterogeneous) ทำให้ดูดซับสาร เอาสารที่มี Functional group ที่แตกต่างกัน เช่น Phenolic, Carboxylic, Aldehydic ซึ่งสิ่งเหล่านี้ ล้วนมีผลทำให้ค่า Overall recovery อยู่ในระดับต่ำ

2.7.3 ตัวกรองระดับโมเลกุลคาร์บอน (Carbon Molecular Sieves)

ตัวกรองเป็นสารดูดซับที่เตรียมได้จากสารอนินทรีย์สังเคราะห์ โดยผ่านการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้เผาอย่างเหมาะสม (สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส) วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์อาจจะเป็น Polyvinylchloride หรือ Petroleum pitch

CMS มีลักษณะโครงข่ายของคาร์บอนเป็นแบบผลึก ประกอบด้วยช่องว่างหรือโพรงซึ่งเชื่อมติดกันด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่แน่นอน คือ 3, 4, 5, 10 อังสตรอม (Å) และมีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1,100 m²/g โดยทั่วไปแล้วจะใช้จับหรือแยกก๊าซที่มีขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่แน่นอน และมีประสิทธิภาพในการจับกับโมเลกุลที่มีขนาดเล็กหรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอน ในช่วง 2-5 อะตอม (C₂ - C₅)

2.7.4 ซิลิกาเจล (Silicagel)

ซิลิกาเจลเป็นสารสังเคราะห์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี ระหว่างกรดซิลฟูริกกับโซเดียมซิลิเกต สามารถนำมาใช้จับสารอนินทรีย์และสารที่มีขี้ เช่น Aromatics โครงสร้างภายในของซิลิกาเจล ประกอบด้วยตาข่ายจำนวนมากเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กที่เชื่อมถึงกัน และสามารถใช้เป็นสารดูดซับที่มีความจุสูงสุด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซิลิกาเจลจะปล่อยสารที่ถูกดูดซับออกไป และเมื่อเย็นลงจะมีความจุ

คงเดิม กระบวนการดูดซับและปล่อยออกของซิลิกา นี้ สามารถดำเนินไปได้หลายครั้งโดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพเสื่อมลง โครงสร้างภายในซิลิกาเจลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและกายภาพ

ซิลิกาเจลใช้ดูดซับสารได้ส่วนใหญ่ ยกเว้นต่างเข้มข้น และกรดไฮโดรฟลูออริก แต่จะไม่เป็นผลเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 260 องศาเซลเซียส ข้อจำกัดของซิลิกาเจลคือ เป็นสารที่มีความเป็นโพลาร์ จะสามารถจับน้ำได้ดี ทำให้กระบวนการดูดซับสาร โดยน้ำจะไปแทนที่สารได้

2.7.5 ซิลิกาไฮโดรเจล (Silica hydrogel)

ซิลิกาไฮโดรเจลเป็นตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นจากซิลิกอนไดออกไซด์อสัณฐานผ่านกระบวนการสังเคราะห์ จนมีคุณสมบัติในการบวมน้ำสูง (Swelling degree) และมีสัดส่วนความเป็นเจลเกิดขึ้น (Gel fraction) นั่นจึงทำให้ซิลิกาไฮโดรเจลมีคุณลักษณะทางกายภาพที่แตกต่าง และมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่าซิลิกอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปซิลิกาไฮโดรเจลใช้ดูดซับความชื้น ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ทำให้สารที่ไม่ละลายผสมเข้ากันได้ดี เช่น น้ำกับน้ำมัน และในอุตสาหกรรมโอเลโอเคมี (Oleochemical) ได้มีการนำซิลิกาไฮโดรเจลมาใช้สำหรับการกำจัดกรด หรือสารเจือปนที่มีขี้ผึ้งในน้ำมันพืชเกรดบริโภค

2.8 การกระตุ้นตัวดูดซับ (Activated Adsorbent) [22-23]

การกระตุ้นหรือปรับปรุงตัวดูดซับสามารถทำได้ทั้งวิธีการทางกายภาพ และวิธีทางเคมี (Physical and Chemical treatment) เช่น คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization), ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (HTC), การชุบด้วยสารกระตุ้นอาจเป็นเกลือที่เป็นกรด เบส หรือเกลือของโลหะ หรือกระบวนการ Pyrolysis เป็นต้น โดยกระบวนการปรับปรุง และกระตุ้นตัวดูดซับ มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงโครงสร้าง เพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ปริมาณของรูพรุน หรือการสร้างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ ตัวอย่างการกระตุ้นตัวดูดซับ เช่น การใช้ $ZnCl_2$ ในการกระตุ้นคาร์บอน ทำหน้าที่เป็นกรดซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน จึงทำให้ได้ผลผลิตถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น หนึ่งในผลลัพธ์ที่ดีที่ได้รับจากการใช้ $ZnCl_2$ คือการกระตุ้นร่วมกับชีวมวล Arundo Donax [22] โดยใช้เทคนิคการผสมแบบแห้งในอัตราส่วนการทำให้อยู่ที่ 3:1 ($ZnCl_2$:Biomass) และภายใต้อุณหภูมิการเปิดใช้งานต่ำที่ 500 °C ผลผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 3,298 m^2/g อีกหนึ่งตัวอย่างคือ การผลิตกระดาษคาร์บอนกัมมันต์[25] ด้วยการนำไม้ไผ่ไปกระตุ้นด้วยสารเคมีโดยใช้สารกระตุ้น KOH และ $KMnO_4$ กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีโดยการแช่ถ่านไม้ไผ่ 100 กรัมใน KOH หรือ $KMnO_4$ ที่มีความเข้มข้น 2.5% เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นนำถ่านลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง. หลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้ว ทำการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Fritsch, pulverisette 7 premium line) ให้ขนาดของถ่านกัมมันต์ลดลง โดยทำให้มีขนาดเฉลี่ย 449.48 นาโนเมตร ในการผลิตกระดาษกัมมันต์นาโนพอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศักดา มณีโรจน์ [18] ศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มในหม้อแปลง 22 KV ได้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆของน้ำมันหม้อแปลง ได้แก่ ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ ค่าเปอร์มิตติวิตี ค่าปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด แรงดึงผิว จำนวนอนุภาค ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสีย ค่าความหนืด ก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมัน และสารประกอบฟูราน เมื่อนำผลการทดสอบคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น มาวิเคราะห์โดยการเก็บตัวอย่างมาทดสอบทุกๆ 3 เดือน เป็นระยะเวลา 21 เดือน พบว่าในการการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีค่าการทดสอบเปอร์มิตติวิตีคั้งที่ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติได้ ผลการการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์พบว่า เอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงสุด รองลงมาคือ น้ำมันปาล์ม และน้ำมันแร่ตามลำดับ แต่น้ำมันปาล์มจะมีค่าคงทนสูงกว่าน้ำมันแร่ในช่วงหนึ่งของระยะเวลาการใช้งานเท่านั้น และจะลดลงต่ำที่สุดเมื่อใช้เป็นเวลานาน ส่วนค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียพบว่า น้ำมันปาล์มมีค่าการสูญเสียสูงที่สุด ในการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันทั้ง 3 ชนิด พบว่า น้ำมันปาล์มมีค่าความเป็นกรดสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆมาก ซึ่งเป็นผลจากปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นที่สูง ส่วนการทดสอบปริมาณความชื้นในน้ำมันพบว่า น้ำมันปาล์มมีปริมาณความชื้นสูงสุด รองลงมาคือเอสเทอร์ธรรมชาติ หากพิจารณาผลของค่าความเป็นกรด และปริมาณความชื้นของน้ำมันปาล์มที่สูง โดยเปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ควบคู่กัน การที่น้ำมันปาล์มมีค่าการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีที่กล่าวมาข้างต้นสูง แต่ยังสามารถรักษาคุณสมบัติการคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงถึงน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเลือกมาพิจารณาเป็นน้ำมันทดแทน แต่ในการทดสอบหาค่าสารประกอบฟูรานที่ละลายอยู่ในน้ำมัน กลับพบว่าในน้ำมันปาล์มมีค่าสารประกอบฟูรานต่ำที่สุด ซึ่งขัดแย้งกับปริมาณกรดที่พบในน้ำมันที่น่าจะทำให้ฉนวนกระดาษเกิดการย่อยสลายมากกว่า

Sornjam, N. and Klairuang, N. [5] ได้ทดสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงโดยการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟูราน (Furan) เพื่อใช้ในการระบุการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษด้วยวิธีการใช้ดัชนี CFAE และนำมาคำนวณเป็นค่าระดับพอลิเมอโรเซชัน (DP) โดยสาเหตุที่วัดความเข้มข้นของสารประกอบฟูแรน (Furan) เนื่องจากปฏิกิริยาภายในหม้อแปลงประกอบด้วย ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis), ออกซิเดชัน (Oxidation) และการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis) ซึ่งผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาคือน้ำและกรด ส่งผลให้เกิดการสลายของกระดาษเซลลูโลส เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสอิสระ ซึ่งจะสลายตัวต่อไปเพื่อสร้างสารประกอบฟูราน (Furan) นอกจากนี้ยังวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซที่ละลายในน้ำมัน (Dissolved gas analysis : DGA) ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์หลักหลังจากการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสของฉนวนกระดาษ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าวอ้างอิงจากงานวิจัยในปี 2006 ของ T.V. Oommen [8] เรื่อง Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers : Part II – Maintaining Insulation Integrity and Life ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในหม้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด และศึกษาการเปรียบเทียบการใช้งานฉนวนกระดาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 140 องศาเซลเซียส 180 วัน , 160 องศาเซลเซียส 90 วัน และ 180 องศาเซลเซียส 30 วัน พบว่าที่เริ่มต้นกระดาศมีระดับพอลิเมอไรเซชัน (DP) อยู่ที่ 952 ซึ่งลดเหลือ 549 ,181 และ 104 ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของฉนวนกระดาศ และผลิตภัณฑ์ น้ำ กรด และก๊าซ ที่เกิดขึ้น จะส่งผลต่อเป็นวัฏจักรของปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้น

Rapp, K.J และคณะ [4] ได้ศึกษาสมดุลการเคลื่อนที่ของน้ำที่อยู่ในน้ำมันกับกระดาศระหว่างน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันแร่ พบว่าสมดุลของน้ำในเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าสูงกว่าน้ำมันแร่ ซึ่งแสดงถึงการสะสมของน้ำในกระดาศในปริมาณที่น้อย จึงเป็นผลดีในการชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งเปรียบเทียบได้กับน้ำมันปาล์มที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง แต่น้ำมันปาล์มยังมีข้อจำกัดที่จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ มีปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นสูง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการเริ่มปฏิกิริยาทั้งสองดังกล่าว ดังนั้นการหาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มจึงมีความสำคัญในการพัฒนาคุณภาพน้ำมันปาล์มสู่การเป็นน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ

Chuntranuluck, S. and Chiamsandusadee, S. [19] งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันปาล์มที่เลิกใช้จากการทอดอาหารชนิดต่างๆ ได้แก่ อาหารจานด่วน, อุตสาหกรรมขนมปังสำเร็จรูป และปาห่องโก๋ โดยตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นตัวดูดซับจำพวกซิลิกา 4 ชนิด ได้แก่ Silica Hydrogel and Alumina Blend (R100), Silica Hydrogel and Perlite Blend (C201), Silica Xerogel (C930) และ Spray-Dried Sodium Silicate (F100) ที่ระดับความเข้มข้น 1-3 % จากการทดลองตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันคือ Sodium Silicate ที่ความเข้มข้น 3% โดยสามารถลดกรดไขมันอิสระได้ถึงร้อยละ 90 % แต่เนื่องจากมี Na₂O เป็นองค์ประกอบในตัวดูดซับ จึงส่งผลให้น้ำมันมีความหนืดสูง มีสีที่คล้ำ และส่งผลให้การทดสอบค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 nm (Spectrophotometer) มีค่าสูง แต่หากพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระของตัวดูดซับชนิดอื่น Silica Hydrogel and Alumina Blend (R100) และ Silica Hydrogel and Perlite Blend (C201) มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่า Sodium Silicate แต่ไม่ทำให้น้ำมันมีค่าการดูดกลืนแสงและความหนืดเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน Silica Xerogel (C930) ทำให้น้ำมันมีค่าการดูดกลืนแสงและความหนืดที่ต่ำลง โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

Manuale, D.L และคณะ [17] เป็นงานวิจัยที่ศึกษาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระในไบโอดีเซลด้วยการดูดซับ โดยในการเริ่มต้นจะเป็นขั้นตอนการเตรียมน้ำมัน เปลี่ยนโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) และทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) กำจัดสบู่และน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการดูดซับกรดไขมันอิสระ ซึ่งตัวดูดซับที่เลือกใช้คือซิลิกาไฮโดรเจล (Silica Hydrogel :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TriSyl 300B ,TriSyl 450 และ TriSyl 3000) สาเหตุที่เลือกใช้ตัวดูดซับประเภทนี้เพราะว่าโครงสร้างของน้ำมันส่วนใหญ่ไม่มีขี้ผึ้ง มีเพียงโครงสร้างของกรดเพียงบางส่วนเท่านั้นที่มีสภาพความเป็นขี้ผึ้ง จึงเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีขี้ผึ้งแรงๆเพื่อให้มีโอกาสในการดูดซับกรดได้มากที่สุด การวัดผลจะคำนวณหาปริมาณตัวดูดซับบนของแข็ง (Adsorption kinetics : g Oleic acid/100 g absorbent) สร้าง Adsorption Isotherm เพื่อคุณสมบัติในการดูดซับ และจากการทดลองพบว่า TriSyl 3000 มีความสามารถในการดูดซับที่ดีที่สุดที่ปริมาณ 99.3% ในสภาวะ 160 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที นอกจากนี้ยังกล่าวถึงประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง ,ปริมาณน้ำที่ตกค้างในตัวดูดซับ หากปริมาณน้ำในตัวดูดซับสูงจะส่งผลให้ตัวดูดซับเกาะตัวกันเป็นก้อน การกระจายลดลง และสภาวะสุญญากาศส่งผลให้การดูดซับกรดไขมันอิสระมีประสิทธิภาพกว่า 3-4 เท่า จากสภาวะปกติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

การศึกษาวិธีการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มเกรดบริโภคน ด้วยกระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) มีขั้นตอนการทำงาน คือ การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ และการสร้างไอโซเทอมของการดูดซับจากข้อมูลสมดุล

3.1 การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

3.1.1 สารเคมี

- 1) เอทิลแอลกอฮอล์ เกรด AR (Ethyl alcohol AR grade)
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide pellets)
- 3) สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
- 4) น้ำมันปาล์ม บริษัทสุโขสมบูรณ์ น้ำมันปาล์มจำกัด
- 5) น้ำกลั่น

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง รุ่น XS6002S ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
- 2) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate รุ่น C-MAG HS 7 ยี่ห้อ IKA +
- 3) Magnetic bar)
- 4) ขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร
- 5) บิวเรต 25 มิลลิลิตร 1 อัน
- 6) ปีกเกอร์ 250 มิลลิลิตร 1 ใบ
- 7) กระบอกตวง 50 มิลลิลิตร 1 ใบ
- 8) ขวดวัดปริมาตร 500 มิลลิลิตร 1 ใบ
- 9) ที่ตั้ง และ Clamp

3.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ นำมาใส่ในบิวเรต เพื่อใช้ในการไทเทรต อ่านปริมาตรเริ่มต้น
- 2) ชั่งน้ำมัน 56.2-56.6 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนัก
- 3) ตวงเอทิลแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตรใส่ปีกเกอร์ หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 5-6 หยด เขย่าให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ผสมเอทิลแอลกอฮอล์กับน้ำมันที่เตรียมไว้ในขวดรูปชมพู่ และอุ่นน้ำมันจนมีอุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส
- 5) ทำการไทเทรตเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระจนกว่าน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู หรือ ม่วงที่ชัดเจน
- 6) บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป

3.2 การศึกษาอายุของน้ำมันปาล์มต่อการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระ

3.2.1 สารเคมี

- 1) สารเคมีตามหัวข้อการทดลองที่ 3.1.1

3.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) อุปกรณ์การทดลองตามหัวข้อที่ 3.1.2

3.2.3 วิธีการทดลอง

- 1) เตรียมน้ำมันปาล์มปริมาตร 1 ลิตร เก็บไว้ในสภาพแวดล้อมปกติ อุณหภูมิห้อง และมีการสัมผัสกับอากาศ
- 2) แบ่งน้ำมันมาทำการไทเทรตตามขั้นตอนที่ 3.1.3 ทุกๆ 1 วัน 2 วัน 4 วัน และ 11 วัน
- 3) บันทึกผลการทดลอง และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ

3.3 การศึกษาตัวดูดซับและสภาวะสำหรับการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

ตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นตัวดูดซับประเภทซิลิกาไฮโดรเจล โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Chuntranuluck,S และคณะ [19] และManuale,D L และคณะ [17] และได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท Biz Bees จำกัด โดยข้อมูลจำเพาะของตัวดูดซับแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงคุณลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
Trisyl 300	ความชื้น (Moisture (160 °C))	%	57.0 – 63.0
	ขนาด (Average particle Size)	µm	15.7 -25.7
	SiO ₂ Content (dry basis)	%	99
	Tapped Bulk Density	g/l	500
	pH (15% aqueous suspension)		2.5
	พื้นที่ผิว (Specific surface area)	m ² /g	700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Trisyl 450	ความชื้น (Moisture (160 °C))	%	57.0 – 63.0
	ขนาด (Average particle Size)	µm	25.0 - 38.0
	SiO ₂ Content (dry basis)	%	97
	Bulk Density	g/l	500
	pH (15% aqueous suspension)		5
Trisyl 3000	ความชื้น (Moisture (160 °C))	%	57.0 – 63.0
	ขนาด (Average particle Size)	µm	23.0 - 28.0
	SiO ₂ Content (dry basis)	%	97
	Bulk Density	g/l	500
	pH (15% aqueous suspension)		5

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเงื่อนไขของตัวดูดซับซิลิกาไฮโดรเจล และการกำจัดความชื้นในน้ำมัน

เงื่อนไขการดูดซับ	การดูดซับ	การกำจัดความชื้น
ความดัน	ความดันบรรยากาศ	50-100 มิลลิบาร์
อุณหภูมิ	75 – 80 องศาเซลเซียส	90-95 องศาเซลเซียส
เวลาในการดูดซับ	15 นาที	-
ความชื้นในน้ำมัน	2000-4000 ppm	น้อยกว่า 1000 ppm

จากตารางที่ 3.1 จึงทำการทดลองปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆได้แก่ ชนิดตัวดูดซับ และอุณหภูมิ ในการดูดซับ เพื่อหาขีดจำกัดความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระให้อยู่ในปริมาณน้อยกว่า 50 ppm โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.3.1 สารเคมี

- 1) ตัวดูดซับสังเคราะห์ TriSyl 3 ชนิด
- 2) เอทิลแอลกอฮอล์ เออาร์ เกรด (Ethyl alcohol AR grade)
- 3) ไอโซโพรพานอล เออาร์เกรด (Isopropanol AR grade)
- 4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide pellets)
- 5) สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
- 6) น้ำมันปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate รุ่น C-MAG HS 7 ยี่ห้อ IKA + Magnetic bar)
- 2) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น XS6002S ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
- 3) ขวดกรองสาร (Suction flask) 500 มิลลิลิตร 2 ใบ
- 4) Rotary Vane Vacuum Pumps 1 ตัว
- 5) ปีกเกอร์ 150 มิลลิลิตร 3 ใบ
- 6) ปีกเกอร์ 50 มิลลิลิตร 3 ใบ
- 7) ขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร 3 ใบ
- 8) ซ้อนตักสาร และหลอดดูด
- 9) กระดาษกรอง (Filter paper) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 1
- 10) อุปกรณ์สำหรับไทเทรตตามหัวข้อที่ 3.1.2

3.3.3 วิธีการทดลอง

การเตรียมตัวดูดซับ

- 1) ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับ Trisyl300 5 กรัม ลงในปีกเกอร์ 150 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำละลายไอโซโพรพานอล ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ในปีกเกอร์ 1000 มิลลิลิตร
- 3) นำปีกเกอร์ที่มีสารละลายวางบนเครื่องกวนสาร ตั้งความเร็วรอบไว้ที่ 150 รอบ/นาที อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใส่ตัวดูดซับลงไป กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
- 4) เมื่อครบเวลาตามที่กำหนด ทิ้งให้เย็นลง จากนั้นกรองตัวดูดซับออกจากสารละลายด้วย Oil Free Vacuum Pump Rocker และนำไปอบที่ 180 องศาเซลเซียส 1.30 ชั่วโมง

การทดลองการดูดซับ

- 1) ทำการทดลองที่ 1 ตามแผนการทดลองในตารางที่ 3.3 โดยการชั่งน้ำมัน 100 กรัม และตัวดูดซับ 1 กรัม ใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 150 และ 50 มิลลิลิตร
- 2) ค่อยๆเทตัวดูดซับลงในปีกเกอร์ วางบนเครื่องกวนสาร ตั้งความเร็วรอบไว้ที่ 150 รอบ/นาที ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 3) นำปีกเกอร์ออกมา และกรองตัวดูดซับด้วย Rotary Vane Vacuum Pumps
- 4) ทำการไทเทรตเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระจนกว่าน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู หรือม่วงที่ชัดเจน ตามหัวข้อที่ 3.1.3 บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
- 5) ทำการทดลองลำดับที่ 2-6 โดยเปลี่ยนชนิด และอุณหภูมิในการดูดซับโดยการใช้ความร้อนจาก Heater ของเครื่องปั่นกวน

ตารางที่ 3.3 ตารางการทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระ

ลำดับ	ชนิดตัวดูดซับ	อุณหภูมิในการดูดซับ (°C)
1	TriSyl300	30
2	TriSyl450	30
3	TriSyl3000	30
4	TriSyl300	75
5	TriSyl450	75
6	TriSyl3000	75
7	Trisyl300_mod	30
8	Trisyl450_mod	30
9	Trisyl3000_mod	30

3.4 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ และสมดุลของการดูดซับ

หลังจากที่ได้สภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3 ทำการทดลองเพื่อศึกษาจลนศาสตร์ และสมดุลการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับชนิด TriSyl300 เพียงชนิดเดียวดังนี้

3.4.1 สารเคมี

- 1) เอทิลแอลกอฮอล์ เออาร์ เกรด (Ethyl alcohol AR grade)
- 2) ไอโซโพรพานอล เออาร์ เกรด (Isopropanol AR grade)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide pellets)
- 4) สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
- 5) น้ำมันปาล์ม
- 6) ตัวดูดซับสังเคราะห์ (TriSyl 300)

3.4.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) อุปกรณ์การเตรียมตัวดูดซับตามหัวข้อที่ 3.3.2
- 2) อุปกรณ์สำหรับไทเทรตตามหัวข้อที่ 3.1.2

3.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ โดยการแปรเปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ และระยะเวลาในการดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

- 1) ล้างตัวดูดซับด้วยไอโซโพรพานอล และอบตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 90 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ชั่งน้ำมัน 70 กรัม ใส่ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร 6 ใบ
- 3) นำปีกเกอร์ทั้ง 6 ใบที่บรรจุน้ำมันวางบนเครื่องกวนสาร ตั้งความเร็วรอบไว้ที่ 150 รอบ/นาที ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง
- 4) ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับที่ผ่านการอบในปริมาณ 0.07 กรัม ใส่ในปีกเกอร์ทุกใบ และเริ่มจับเวลา
- 5) เมื่อครบ 10 นาที นำปีกเกอร์ใบที่ 1 ออกมา กรองน้ำมันออกจากตัวดูดซับ ชั่งน้ำหนักน้ำมันจากนั้นนำมา หาปริมาณกรดไขมันอิสระตามวิธีในหัวข้อ 3.1.3
- 6) ที่เวลา 15, 20, 30, 45 และ 60 นาที นำปีกเกอร์ ใบที่ 2-6 มากรองตัวดูดซับออก และนำมาไทเทรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระ
- 7) ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-6 โดยใช้ตัวดูดซับ 0.35 และ 0.7 กรัมตามลำดับ
- 8) นำผลการทดลองที่ได้ไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ และวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการดูดซับ

การศึกษาสมดุลการดูดซับ

- 1) ล้างตัวดูดซับด้วยไอโซโพรพานอล และอบตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 90 นาที
- 2) ชั่งน้ำมัน 70 กรัม ใส่ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร 6 ใบ
- 3) นำปีกเกอร์ทั้ง 6 ใบที่บรรจุน้ำมันวางบนเครื่องกวนสาร ตั้งความเร็วรอบไว้ที่ 150 รอบ/นาที ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง
- 4) ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับที่ผ่านการอบในปริมาณ 0.07 0.2, 0.35, 0.7, 1.4 และ 2.1 กรัม ใส่ในปีกเกอร์แต่ละใบ และเริ่มจับเวลา
- 5) เมื่อครบ 90 นาที นำปีกเกอร์ทุกใบออกมา กรองน้ำมันออกจากตัวดูดซับ ชั่งน้ำหนักน้ำมันจากนั้นนำมา หาปริมาณกรดไขมันอิสระตามวิธีในหัวข้อ 3.1.3
- 6) ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-5 โดยทำที่อุณหภูมิ 60 และ 90 องศาเซลเซียสตามลำดับ
- 7) นำผลการทดลองที่ได้ไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ และวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการดูดซับ

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มที่ผ่านการดูดซับจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการลดลงของกรดไขมัน โดยการวิเคราะห์จะทำได้โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณของกรดไขมันอิสระแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการดูดซับ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลการทดลองดังกล่าวในการวิเคราะห์ถึงความสามารถในการเลือกของตัวดูดซับ (Selectivity)

3.6 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มเพื่อพัฒนาสู่น้ำมันหม้อแปลง

3.6.1 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ ดำเนินการทดสอบด้วยภาชนะสำหรับทดสอบที่มีอิเล็กโตรดติดตั้งอยู่ทั้งสองฝั่งภายใน โดยมีระยะแก๊ประหว่างอิเล็กโตรดคือ 1 และ 2 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน ASTM D1816-12 [24] การทดสอบจะเริ่มจากการป้อนแรงดันกระแสสลับจนกว่าจะเกิดประกายไฟหรือเบรกดาวน์ขึ้น และจะแสดงผลลัพธ์เป็นค่าแรงดันสูงสุดในการทดสอบหน่วยกิโลโวลต์ การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์แสดงดังรูปที่ 3.1

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ ดำเนินการทดสอบด้วยภาชนะสำหรับทดสอบที่มีอิเล็กโตรดติดตั้งอยู่ทั้งสองฝั่งภายใน โดยมีระยะแก๊ประหว่างอิเล็กโตรดคือ 1 และ 2 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน ASTM D1816-12 [24] การทดสอบจะเริ่มจากการป้อนแรงดันกระแสสลับจนกว่าจะเกิดประกายไฟหรือเบรกดาวน์ขึ้น และจะแสดงผลลัพธ์เป็นค่าแรงดันสูงสุดในการทดสอบหน่วยกิโลโวลต์ การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์

3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอน 3.1-3.6 โดยการเปรียบเทียบผลจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับประกอบด้วย ชนิดของตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิ และช่วงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ โดยใช้วิธีการทางสถิติในการเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ เพื่อหาบุสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบที่ใช้สำหรับการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

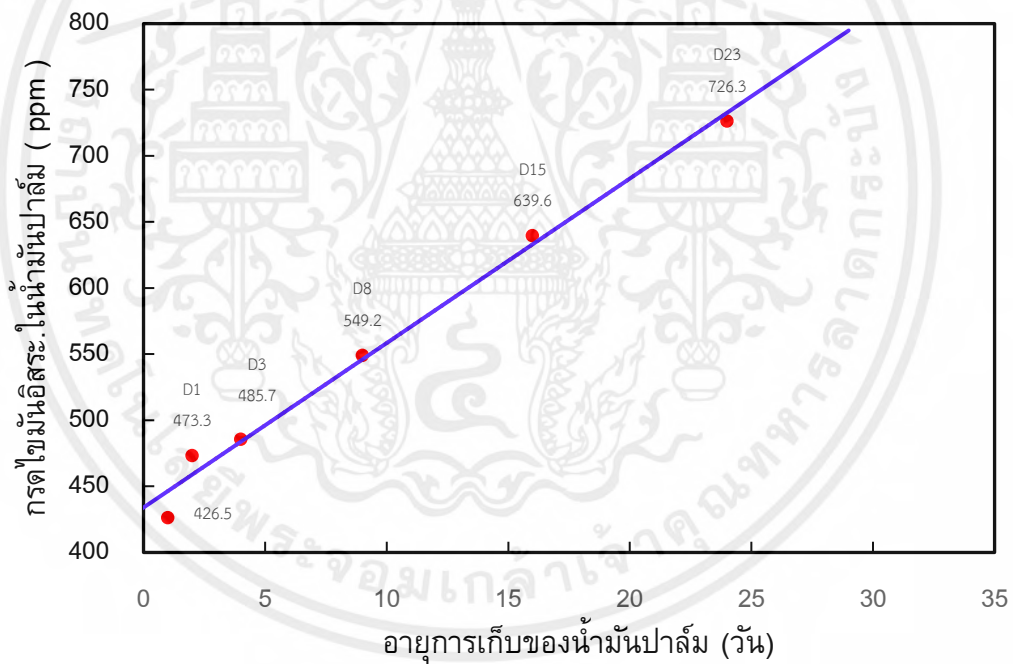
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันปาล์มหลังกระบวนการดูดซับ

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระเริ่มต้นในน้ำมันปาล์ม

ผลการทดสอบความเปลี่ยนแปลงปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มที่ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและเก็บตัวอย่างออกมา ผลของปริมาณ FFA เทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นที่ 426.5 ppm จากนั้นเพิ่มเป็น 473.3, 485.7, 549.2, 639.6 และ 726.3 เมื่อเวลาผ่านไป 1, 3, 8, 15 และ 23 วันตามลำดับ โดยมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาของกรดไขมัน ทำให้ทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตามอายุการเก็บ

ดังนั้นการนำไปใช้ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เป็นเวลานาน จะต้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เพื่อยับยั้งหรือลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันซึ่งส่งผลอย่างมากต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 กรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มหลังกระบวนการดูดซับ

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของตัวดูดซับแต่ละชนิดที่สภาวะต่างๆ โดยใช้ไขมันปาล์ม 100 กรัม และตัวดูดซับ 1 กรัม มีกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 694 ppm พบว่าการดูดซับที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ปริมาณ FFA ลดลงค่อนข้างน้อย โดยลดลงในช่วง 14.3-74.4 ppm เท่านั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาตามข้อแนะนำการใช้งานของบริษัทผู้ผลิต พบว่า FFA ลดลง 0.1-101.1 ppm ซึ่งยังห่างจากเป้าหมายที่ต้องการ จึงได้หาวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับ และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณ FFA มีการลดลงอย่างชัดเจนลงมาเหลือ 149.3-124.9 ppm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันอิสระของตัวดูดซับแต่ละชนิด

ลำดับ	ชนิดตัวดูดซับ	อุณหภูมิในการดูดซับ (°C)	เวลาในการดูดซับ (นาที)	FFA ก่อนการดูดซับ (ppm)	FFA หลังการดูดซับ (ppm)
1	Trisyl300	30	30	694	679.7
2	Trisyl450	30	30	694	620.9
3	Trisyl3000	30	30	694	619.6
4	Trisyl300	75	15	694	693.9
5	Trisyl450	75	15	694	592.9
6	Trisyl3000	75	15	694	617.4
7	Trisyl300_mod	30	30	694	149.3
8	Trisyl450_mod	30	30	694	125.1
9	Trisyl3000_mod	30	30	694	124.9

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวมีผลต่อการลดปริมาณ FFA จึงได้ทำการทดลองต่อ โดยการศึกษากำหนดปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อปริมาณ FFA โดยเลือก TriSyl300 มาทำการศึกษาต่อ เนื่องจากเกรดอื่นไม่มีการนำเข้ามาขายแล้ว ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุง

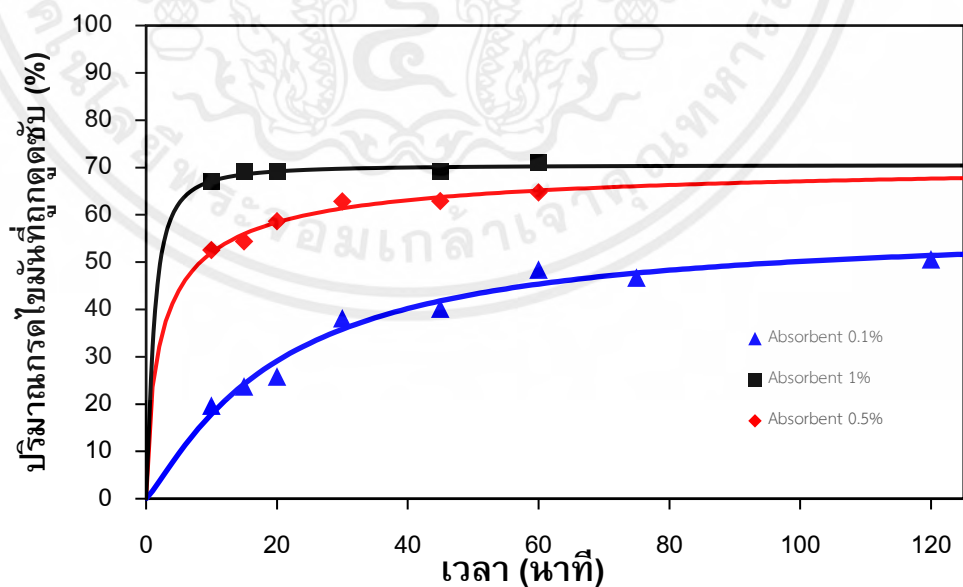
ชนิดตัวดูดซับ	น้ำหนัก oil (g)	น้ำหนัก Absorbent (g)	FFA ก่อนการดูดซับ (ppm)	FFA หลังการดูดซับ (ppm)
Trisyl300_mod	100	1	425.6	155.3
Trisyl300_mod	100	2	425.6	90.6
Trisyl300_mod	100	3	425.6	51.8

จากตารางการทดลองที่ 4.3 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้น 3% ของปริมาณตัวดูดซับจากน้ำหนักของน้ำมัน มีปริมาณกรดไขมันอิสระหลังจากการดูดซับคือ 51.8 ppm แสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวดูดซับมีผลต่อปริมาณ FFA ที่หลงเหลืออยู่ จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนจลศาสตร์ และใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ

4.2 ผลการวิเคราะห์กระบวนการดูดซับ

4.2.1 จลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาเรื่องจลศาสตร์ในการดูดซับทำให้ทราบถึงระยะเวลาที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุล ซึ่งมีประโยชน์ในการออกแบบการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลสมดุลของการดูดซับ และออกแบบกระบวนการที่ใช้ในการดูดซับ โดยผลการทดลองที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.1%, 0.5% และ 1% แสดงดังรูปที่ 4.2



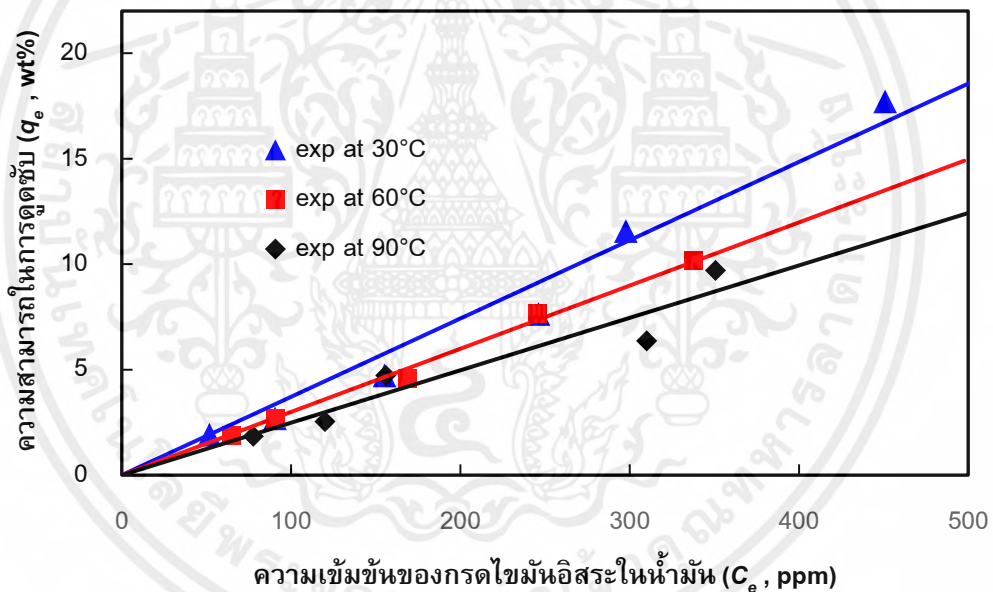
รูปที่ 4.2 จลศาสตร์ของการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าในระบบที่มีปริมาณตัวดูดซับ 1% การเข้าสู่สมดุลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาน้อยกว่า 20 นาที และแนวโน้มของเวลาใช้ในการเข้าสู่สมดุลจะแปรผกผันกับปริมาณตัวดูดซับ โดยระบบที่มีปริมาณตัวดูดซับน้อยจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล อย่างไรก็ตาม ในช่วงปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษาเรื่องสมดุลนั้นใช้เวลาต่ำกว่า 1 ชั่วโมงในการเข้าสู่สมดุล เพื่อให้มั่นใจได้ว่าระบบเข้าสู่สมดุลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาข้อมูล สมดุลของการดูดซับจึงใช้เวลา 1 ชั่วโมง 30 นาทีในการดูดซับ

4.2.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ(Adsorption Isotherm)

ในการออกแบบกระบวนการในการดูดซับ ข้อมูลสมดุลของการดูดซับเป็นสิ่งสำคัญที่จะบ่งบอกถึงข้อจำกัดในการดูดซับ รวมถึงปริมาณของตัวดูดซับที่จำเป็นต้องใช้เพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระให้ได้ตามวัตถุประสงค์ โดยเส้นไอโซเทอมหรือสมมูลการดูดซับที่ความดันบรรยากาศ ณ อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส), 60 องศาเซลเซียส, และ 90 องศาเซลเซียสตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ไอโซเทอรัมที่อุณหภูมิ 30 °C, 60 °C และ 90 °C

จากรูปที่ 4.3 เมื่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มอยู่ในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่า 500 ppm พฤติกรรมของการดูดซับจะให้สมดุลในลักษณะที่เป็นเส้นตรง โดยเมื่อพิจารณาจากระบบตามเส้นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ในช่วงความเข้มข้นต่ำ สมการการดูดซับของแลงเมียร์จะลดรูปได้ดังสมการที่ 4.1

$$q_e = q_0 K_L C_e \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบรูปสมการกับเส้นไอโซเทอมจะเห็นได้ว่า ความชันของเส้นไอโซเทอมแต่ละเส้น จะแสดงค่าคงที่ซึ่งเป็นผลคูณระหว่าง q_0 และ K_L โดยที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เส้นแนวโน้ม ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ และค่าคงที่ q_0K_L

อุณหภูมิในการดูดซับ (°C)	สมการเส้นแนวโน้ม	R ²	q_0K_L
30	$q_e = 0.0371C_e$	0.9907	0.0371
60	$q_e = 0.0299C_e$	0.9984	0.0299
90	$q_e = 0.0248C_e$	0.9777	0.0248

จากสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่สมดุล (C_e) และความสามารถในการดูดซับ (q_e) โดยมีหน่วยเป็นส่วนในล้านส่วน (ppm) ของกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันปาล์ม และร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ของกรดไขมันอิสระที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ตามลำดับ ซึ่งสามารถจัดรูปสมการดังกล่าวเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์สำหรับใช้ประมาณหาปริมาณของตัวดูดซับที่ต้องการใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิต่างๆดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์สำหรับการประมาณหาปริมาณตัวดูดซับที่สถานะต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	สมการความสัมพันธ์
30	$m_s = \frac{m_{oil}(C - C_e)}{371C_e}$
60	$m_s = \frac{m_{oil}(C - C_e)}{299C_e}$
90	$m_s = \frac{m_{oil}(C - C_e)}{248C_e}$

เมื่อ m_s คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ต้องใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระ (กรัม)

m_{oil} คือ ปริมาณของน้ำมันที่ต้องการกำจัดกรดไขมันอิสระ (กรัม)

C คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม (ppm)

C_e คือ ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่ต้องการที่จุดสมดุล (ppm)

สมการดังแสดงในตารางที่ 4.4 นี้เป็นจริงเฉพาะในช่วงที่ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระมีค่าต่ำกว่า 500 ppm เท่านั้น (± 200 ppm) โดยช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่านี้ การคำนวณด้วยสมการดังกล่าวอาจได้ค่าที่คลาดเคลื่อน ซึ่งน้ำมันปาล์มที่ใช้สำหรับทำน้ำมันหม้อแปลงนั้นต้องการให้มีระดับกรดไขมันอิสระที่เจือปนต่ำกว่า 50 ppm และเนื่องจากวัตถุประสงค์ในการเตรียมน้ำมันดังกล่าวได้มาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค ซึ่งโดยทั่วไปมีปริมาณกรดไขมันอิสระที่เจือปนประมาณ 500 ppm ดังนั้นในการดูดซับเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิต่างๆเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันหม้อแปลง จำเป็นต้องใช้ปริมาณตัวดูดซับดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	30	60	90
ปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ (กรัม/100 กรัมของน้ำมันปาล์ม)	2.426	3.010	3.629

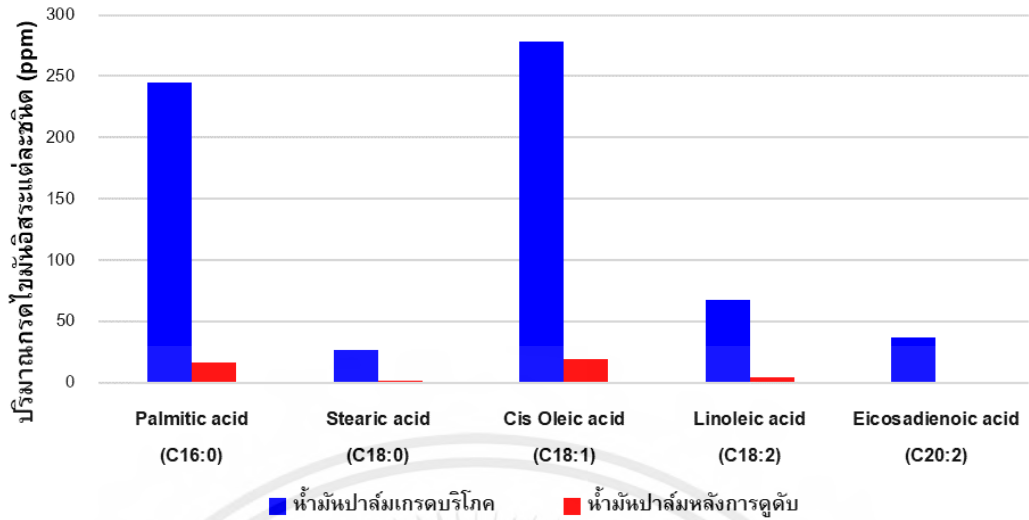
จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ จะจำเป็นต้องใช้ตัวดูดซับปริมาณมากขึ้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นได้ลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้พฤติกรรมของการคายซับเกิดขึ้นได้มากกว่าเดิม

4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติ และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม

เมื่อทราบถึงปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระให้ได้ผลตามเป้าหมาย ผู้ทดลองจึงทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันในปริมาณมากเพื่อใช้น้ำมันดังกล่าวสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัมต่อน้ำมัน 100 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง(30 องศาเซลเซียส) และเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที สามารถปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 691.64 ppm ลงเหลือ 44.53 ppm บรรลุเป้าหมายที่ต้องการให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงต่ำกว่า 50 ppm

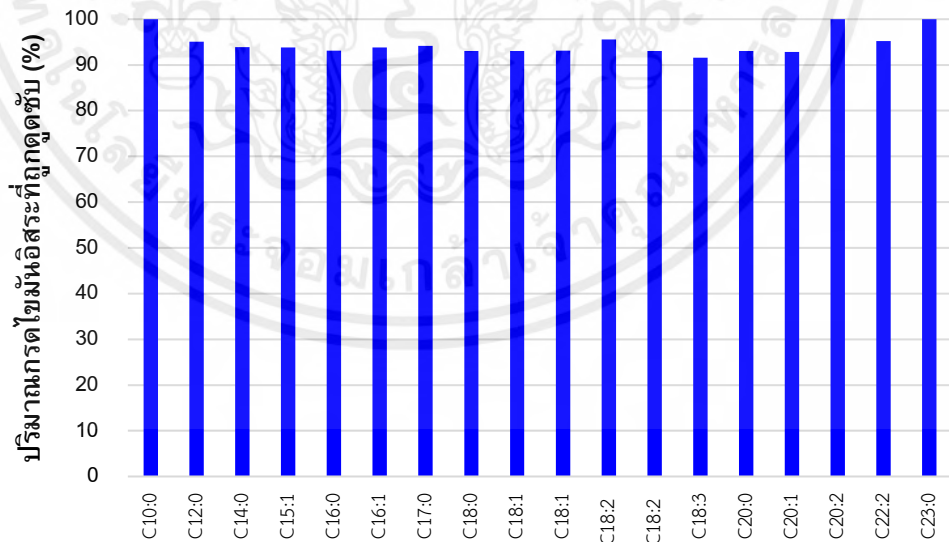
4.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันอิสระ

จากการวิเคราะห์น้ำมันก่อน และหลังการดูดซับด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) และเปรียบเทียบปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันปาล์มได้แก่ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และกรดอีโคซาดีโนอิก ระหว่างก่อนและหลังการดูดซับ พบว่ากรดไขมันทุกตัวมีปริมาณลดลงอย่างชัดเจน โดยการลดลงขององค์ประกอบหลักของกรดไขมันอิสระแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระระหว่างก่อนและหลังการดูดซับ

ผลต่างระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันก่อนและหลังการดูดซับนี้คือกรดไขมันที่ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณของกรดไขมันที่ถูกดูดซับกับปริมาณเริ่มต้นของกรดไขมันชนิดนั้นๆ พบว่ากรดไขมันส่วนใหญ่ถูกดูดซับในช่วงร้อยละ 92 ถึง 95 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จึงสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมการเลือกของตัวดูดซับนั้นไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดไขมันอิสระ



รูปที่ 4.5 ร้อยละการถูกดูดซับของกรดไขมันอิสระแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มเพื่อใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลง

ผลการวิเคราะห์ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์พบว่าน้ำมันปาล์มก่อน และหลังการดูดซับ แสดงดังในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มก่อน และหลังจากการดูดซับ

รายการ	หน่วย	น้ำมันปาล์มก่อนดูดซับ	น้ำมันปาล์มหลังการดูดซับ
ปริมาณกรดไขมันอิสระ	ppm	691.64	44.53
ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ (ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร)	kV	50	61.3
ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ (ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร)	kV	32.6	37.3

จากผลการทดสอบพบว่าน้ำมันปาล์มหลังการดูดซับมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันโดยการลด FFA ด้วยวิธีการดูดซับ นอกจากจะทำให้คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันปาล์มดีขึ้นแล้วนั้น ยังส่งผลให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การลดปริมาณ FFA ในน้ำมันปาล์มให้เหลือระดับต่ำกว่า 50 ppm เช่นเดียวกับน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ เกรดการค้า จึงมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มศักยภาพของน้ำมันปาล์มเพื่อใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลง

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาวิธีการกำจัดกรดไขมันอิสระและสิ่งเจือปนในน้ำมันปาล์มเพื่อพัฒนาสู่การนำไปใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในวิธีการ สภาวะ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม รวมถึงศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันปาล์ม หลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดังกล่าว ทำการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับแบบซิลิกาไฮโดรเจล โดยได้ศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ได้ศึกษาจลศาสตร์ และสมดุลการดูดซับ สามารถสร้างสมการเพื่อประมาณการปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ ที่อุณหภูมิต่างๆได้ และพบว่าปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์ม สำหรับบริเวณที่มีกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 691 ppm ต้องใช้ตัวดูดซับปริมาณ 3 กรัมต่อน้ำมัน 100 กรัม และหลังจากการดูดซับจะมีกรดไขมันอิสระเหลือ 44 ppm โดยการดูดซับดังกล่าวสามารถทำได้ ที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการ ใช้เวลาในการดูดซับ 1 ชั่วโมง 30 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับยังเป็นการกระตุ้นพฤติกรรมคายซับให้เกิดขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง นอกจากนี้ผลการทดลองยังทำให้ทราบว่าเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการดูดซับนั้นจะแปรผกผันกับปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ โดยที่ปริมาณตัวดูดซับ 1% ขึ้นไปจะใช้เวลาน้อยกว่า 20 นาทีในการเข้าสู่สมดุล

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันแต่ละชนิดทั้งก่อน และหลังการดูดซับ โดยใช้เทคนิค HPLC แสดงให้เห็นว่ากรดไขมันอิสระแต่ละประเภท ได้แก่ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และกรดอีโคซาดีโนอิก มีการลดลงอย่างชัดเจน และตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระแต่ละชนิดใกล้เคียงกัน

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มก่อนและหลังการดูดซับพบว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการดูดซับนั้นมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่ระยะห่างในการทดสอบ 2 มิลลิเมตร เท่ากับ 50 kV และ 61.3 kV ตามลำดับ และที่ระยะห่างทดสอบ 1 มิลลิเมตร จะมีค่าเท่ากับ 32.6 kV และ 37.3 kV ตามลำดับ แสดงว่าการลด FFA มีผลทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงขึ้น ค่าที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้การใช้งานน้ำมันปาล์มในการเป็นฉนวนเหลวภายในหม้อแปลงนั้นมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยที่มากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต้องมีการติดตามผลในระยะยาวเพื่อให้ครอบคลุมในการสร้างฐานข้อมูล และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แม่นยำ เนื่องจากการทดสอบด้วยเครื่องบ่งบอกได้เพียงแนวโน้มที่จะเกิดในการใช้งานจริงเท่านั้น ซึ่งยังคงมีความคลาดเคลื่อน และพฤติกรรมของฉนวนเหลวที่ใช้งานจริงในหม้อแปลงไฟฟ้า กับฉนวนเหลวที่ผ่านการเร่งระบวนการทางไฟฟ้าเพื่อทำนายผล มีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน

2. ควรมีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพิ่มเติมอีกหลายประการ ได้แก่ การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ค่าเปอร์มิตติวิตี ตัวประกอบกำลังสูญเสีย และควรมีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเพิ่มเติม ได้แก่ ความหนืด แรงตึงผิว และปริมาณก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมัน เพื่อที่จะบ่งบอกปัจจัยที่ทำให้ น้ำมันปาล์มสูญเสียประสิทธิภาพของความเป็นฉนวนจากการใช้งาน บอกลักษณะที่ก่อกำเนิดขึ้นในสถานะไฟฟ้าแรงสูง และสามารถวิเคราะห์ควบคุมไปกับสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าลดลง

3. ควรมีการควบคุมสภาพแวดล้อมในการเก็บน้ำมันปาล์มก่อนนำมาปรับปรุงคุณภาพ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันปาล์มเพิ่มเติม เช่น การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระ ความชื้นในน้ำมัน และองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆ

4. ความชื้นเริ่มต้นของตัวดูดซับส่งผลอย่างมากในการปรับพื้นผิวตัวดูดซับ ควรมีการหาวิธีควบคุมความชื้นเริ่มต้น หรือทำการอบให้แห้งสนิท เพื่อที่จะสามารถหาข้อสรุปของผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ

5. ควรมีการวิเคราะห์ค่าการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมัน (lipid oxidation) ตามอายุการใช้งานของน้ำมันปาล์ม โดยสามารถวิเคราะห์ผลด้วยค่า Peroxide Value ซึ่งคาดว่าจะมีแนวโน้มเดียวกันกับปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันที่เพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมันมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ใช้งานในหม้อแปลงที่อายุของน้ำมันเท่ากัน

บรรณานุกรม

- [1] N. Lelekakis, W. Guo, D. Martin, J. Wijaya, and D. Susa. 2012. "A Field Study of Aging in Paper-Oil Insulation Systems." **DEIS Feature article**. 28(1) : 12-19.
- [2] Earnst, P. P. Norasage, P. Frank, U. and Michael, M. 2023. **Biological Insulating Liquids: New Insulating Liquids for High Voltage Engineering**. Cham : Springer.
- [3] Rashmi, S. 2003. "Chemistry Behind the Life of a Transformer." **Resonance**. 17-23
- [4] Rapp, K.J. and McShane, C.P. Luksich, J. 2005. "Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and kraft paper." 387-390. In **Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids**. Portugal : ICDL.
- [5] ญัตติพงษ์ ศรีแจ่ม และ นาทยา คล้ายเรือง. 2564. "วิธีการ CFAE สำหรับการประเมินสภาพฉนวนกระดาษชุบน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง." **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**. 23(3) : 44-56.
- [6] Chaiwat, S. 2022. **แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2565-2567: อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม**. [Online]. Available: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/palm-oil/io/oil-palm-industry-2022-2024>.
- [7] Excipia. Accessed : Nov. 06, 2023. **Cellulose Composition and Chemical Characterization Services - Excipia**.. [Online]. Available: <https://www.excipia.eu/excipients/polysaccharides/cellulose/>.
- [8] Chin, P. T. and Imededdine, A. N. 2012. "The Physicochemical Properties of Palm Oil and Its Components in Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses." **Palm oil**. 377-391.
- [9] Oommen, T. V. and Prevost, T. A. 2006. "Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II – Maintaining Insulation Integrity and Life." **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 22(2) : 5-14.
- [10] ดร.ผาสุข กุลละวณิชย์, ดร.สันหทัย กลิ่นพิกุล, ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม, นายชิต ลีมวรพันธ์ และนายธีระพงศ์ จันทนิยม. 2537. **โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องขนาดเล็กสำหรับกลุ่มเกษตรกรสวนปาล์มรายย่อยของประเทศไทย. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. เอกสารอัดสำเนา.

[11] G. Ombick Boyekong, G. Mengata Mengounou, E. Tchamdjio Nkouetcha, and Moukengue Imano, A. 2022. "Investigation of the thermal aging of the natural monoester/paper mixed insulation." **Electrical Engineering**. 104(2) : 3561–3570,

[12] Bou Orm, R. Citeau, M. Comitis, A. Savoie, R. Harscoat-Schiavo, C. Subra-Paternault, P. Carré, P. Leao, J.D. Joffre, F. 2020. "Walnut oil deacidification by liquid-liquid extraction with ethanol in a single- And multistage crossflow process." **OCL**. 27 : 35.

[13] Batista, E. Monnerat, S. Kato, K. Stragevitch, L. and Meirelles, A. J. A. 1999. "Liquid-liquid equilibrium for systems of canola oil, oleic acid, and short-chain alcohols." **J Chem Eng Data**. 44(3) : 1360-1364.

[14] C. B. Gonçalves and A. J. A. Meirelles. 2004. "Liquid-liquid equilibrium data for the system palm oil + fatty acids + ethanol + water at 318.2 K." **Fluid Phase Equilibrium**. 221(1-2) : 139-150.

[15] Greyt, W. D. R&D Manager, Ballestra, D. Zaventem, B. Accessed : Nov. 09, 2023. "Deodorization," [Online]. Available: <https://lipidlibrary.aocs.org/edible-oil-processing/deodorization>.

[16] Geankopolis, C. J. Hersel, A. A. Lepek, D. H. 2018. **Transport Processes and Separation Process Principles**. 5th ED. USA : Pearson Education, Inc.

[17] Manuale, D. L. Torres, G. C. Badano, J. M. Vera, C. R. and Yori, J. C. 2013. "Adjustment of the biodiesel free fatty acids content by means of adsorption." **Energy and Fuels**, 27(11) : 6763-6772.

[18] ศักดา มณีโรจน์. 2564. "การศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานน้ำมันแร่เอสเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์มในหม้อแปลงไฟฟ้า 22 kv." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[19] สาวิตรี จันทรานุกรักษ์, ศदानันท์ เจียมสันดุขฎี. 2549. “การศึกษาความเข้มข้นและเวลาของการดูดซับที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มที่เลิกใช้ชนิดต่างๆ.” หน้า 143-150. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44**. กรุงเทพฯ : สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาเศรษฐศาสตร์ สาขาบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[20] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2558. **ประสิทธิภาพการดูดซับโอโซนจากตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ**. กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

[21] อติศักดิ์ ศิริรักษ์. 2561. “การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีคริสตัลไวโอเล็ต.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[22] Abuelnoor, N. AlHajaj, A. Khaleel, M. Vega, L. F. and Abu-Zahra, M. R. M. 2021. “Activated carbons from biomass-based sources for CO₂ capture applications.” **Chemosphere**. 282 : 131111.

[23] Ma, R. Fakudze, S. Shang, Q. Wei, Y. Chen, J. Liu, C. and Chu, Q. 2021. “Catalytic hydrothermal carbonization of pomelo peel for enhanced combustibility of coal/hydrochar blends and reduced CO₂ emission.” **Fuel**. 304 : 121422.

[24] Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes, D 1816 – 04, ASTM international, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Feb. 1, 2004.

[25] Qanytah, K. Syamsu, F. Fahma, and G. Pari. 2022. “Ethylene Adsorption on Activated Carbon Paper Liner: A Model Kinetic Study.” **IOP Publishing: Earth Environ. Sci**. 1024 : 012022.

[26] Jusner, P. Schwaiger, E. Potthast, A. and Rosenau, T. 2020. “Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – a review.” **Carbohydrate Polymers**. 117196.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

วันที่	อุณหภูมิในการเก็บ (°c)	FFA (ppm)
19/12/2023	ambient	426.5
20/12/2023	ambient	473.3
22/12/2023	ambient	485.7
27/12/2023	ambient	549.2
3/1/2024	ambient	639.6
11/1/2024	ambient	726.3

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการดูดซับกรดไขมันอิสระที่เวลาใดๆ

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (ppm)		
	ตัวดูดซับ 0.1%	ตัวดูดซับ 0.5%	ตัวดูดซับ %
10	504.4	297.6	207.2
15	478.6	286.1	194.1
20	465.8	259.7	194.2
30	388.1	233.1	N/A
45	375.4	232.7	194
60	323.6	221.2	181.1
120	334.4	N/A	N/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการศึกษาสมมูลของการดูดซับ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (ppm)
30	0.07	450.9
	0.2	297.7
	0.35	246.2
	0.7	155.3
	1.4	90.6
	2.1	51.8
70	0.2	337.7
	0.35	245.8
	0.7	168.9
	1.4	90.7
	2.1	65
90	0.2	350.8
	0.35	310.1
	0.7	155.9
	1.4	120
	2.1	77.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

FAC (Fatty Acid Composition)		น้ำมันเกรดบริโภค		Treated oil		Adsorbed		% Selectivity
		% Composition	ppm	% Composition	ppm	ppm	% total	
C6:0	caproic acid	0	0	0	0	0	0	0
C8:0	caprylic acid	0	0	0	0	0	0	0
C10:0	capric acid	0.04202	0.290627128	0	0	0.290627128	0.045240226	100
C12:0	lauric acid	0.24109	1.667474876	0.18518	0.08245695	1.585017926	0.246730475	95.05498094
C14:0	myristic acid	0.94727	6.551698228	0.89624	0.399077747	6.152620481	0.957742464	93.90878924
C15:1	pentadecanoic acid	0.04993	0.345335852	0.04778	0.021275478	0.324060374	0.050444584	93.83919211
C16:0	palmitic acid	35.45384	245.212939	37.91826	16.88424281	228.3286962	35.5425934	93.11445681
C16:1	palmitoleic acid	0.18458	1.276629112	0.17792	0.079224218	1.197404894	0.18639302	93.79426516
C17:0	heptadecanoic acid	0.10515	0.72725946	0.09542	0.042488618	0.684770842	0.106594274	94.1577085
C17:1	heptadecnoic acid	0	0	0	0	0	0	0
C18:0	stearic acid	3.9587	27.37995268	4.29245	1.911342136	25.46861054	3.964549723	93.01919124
C18:1	cis Oleic acid	40.20593	278.0802943	43.18968	19.23150071	258.8487935	40.29347855	93.08419147
C18:1	trans Elaidic acid	0.66726	4.615037064	0.71529	0.318504331	4.296532733	0.668816135	93.09855313
C18:2	trans9,12 linolaidic	0.64505	4.46142382	0.44086	0.196306141	4.265117679	0.663925937	95.59992171
C18:2	linoleic acid	9.85505	68.16146782	10.63798	4.736879734	63.42458809	9.87293487	93.05050216

C18:3	linolenic acid	0.09963	0.689080932	0.13041	0.058068965	0.631011967	0.098225944	91.57298336
C20:0	arachidic acid	0.35331	2.443633284	0.37978	0.169108438	2.274524846	0.354061987	93.07963108
C20:1	gadoleic acid	0.14044	0.971339216	0.15553	0.069254398	0.902084818	0.14042227	92.87021493
C20:2	eicosadienoic acid	5.37565	37.18014566	0	0	37.18014566	5.787615933	100
C20:4	arachidonic acid	0	0	0	0	0	0	0
C22:0	behenic acid	0	0	0	0	0	0	0
C22:1	erucic acid	0	0	0	0	0	0	0
C22:2	docosadienoic acid	0.48541	3.357289724	0.36052	0.160532346	3.196757378	0.497620534	95.21839463
C23:0	Tricosanoic acid	0.48541	3.357289724	0	0	3.357289724	0.522609666	100
C24:0	linoceric acid	0	0	0	0	0	0	0
C24:1	nervonic acid	0	0	0	0	0	0	0
Total FFA (ppm)		691.64		44.528		642.4086548		92.88194072



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของน้ำมันปาล์มก่อนการดูดซับที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร

Measurement Log / BA 80

BA80 19B025

GB5013.19B025

V3.23.3

ASTM D1816-12 : 2

Sample Number

Palm oil retest

Comment

TEST START

2/16/2024 1:01:00 PM

Test 1	37.9 kV
Test 2	57.0 kV
Test 3	46.5 kV
Test 4	50.7 kV
Test 5	57.8 kV

TEST END

2/16/2024 1:16:00 PM

all values (rms)

WITHIN RANGE LIMITS

Mean 50.0 kV

Std. Dev. 7.3 kV

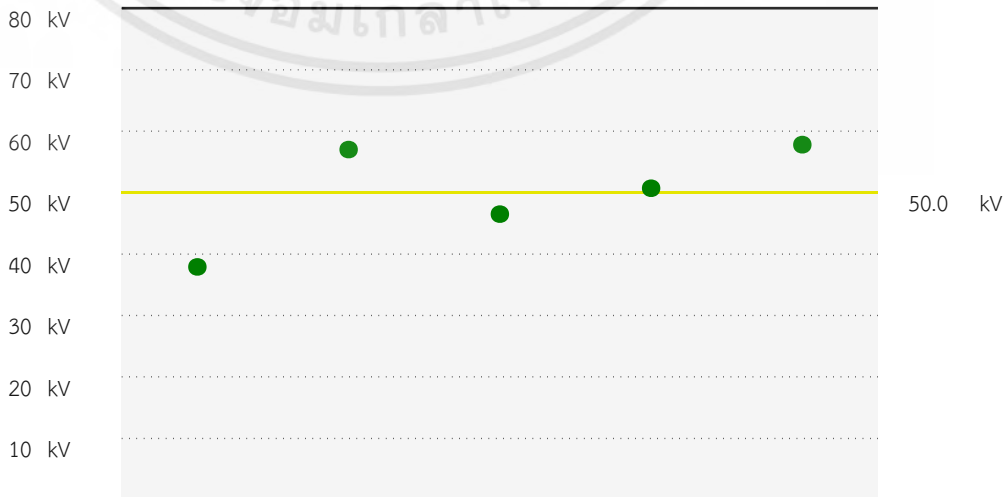
Range 19.9 kV

Std.Dev.Mean 16.4 %

Oil Temperature 26 °C

Test Frequency 60 Hz

Stirrer has been used during Test.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของน้ำมันปาล์มก่อนการดูดซับที่ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร

Measurement Log / BA 80

BA80 19B025

GB5013.19B025

V3.23.3

ASTM D1816-12 : 1

Sample Number

Palm oil retest 1 m

Comment

TEST START

2/16/2024 1:21:00 PM

Test 1	33.8 kV
Test 2	34.5 kV
Test 3	29.1 kV
Test 4	36.1 kV
Test 5	29.4 kV

TEST END

2/16/2024 1:34:00 PM

all values (rms)

WITHIN RANGE LIMITS

Mean 32.6 kV

Std. Dev. 2.8 kV

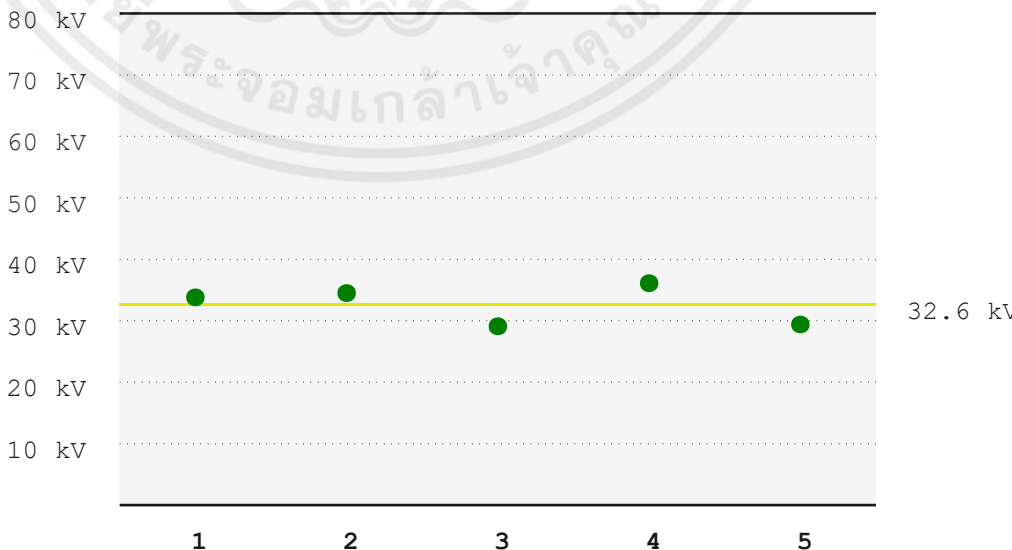
Range 7.0 kV

Std.Dev.Mean 9.7 %

Oil Temperature 26 °C

Test Frequency 60 Hz

Stirrer has been used during Test.



created by BA Control Center Report Engine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมันปาล์มหลังการดูดซับที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร

Measurement Log / BA 80

BA80 19B025

GB5013.19B025

V3.23.3

ASTM D1816-12 : 2

Sample Number **BD test_Palm oil**

Comment

TEST START 2/6/2024 6:53:00 PM

Test 1	47.4 kV
Test 2	62.1 kV
Test 3	68.3 kV
Test 4	70.6 kV
Test 5	57.9 kV

TEST END 2/6/2024 7:10:00 PM all values (rms)

WITHIN RANGE LIMITS

Mean 61.3 kV

Std. Dev. 8.3 kV

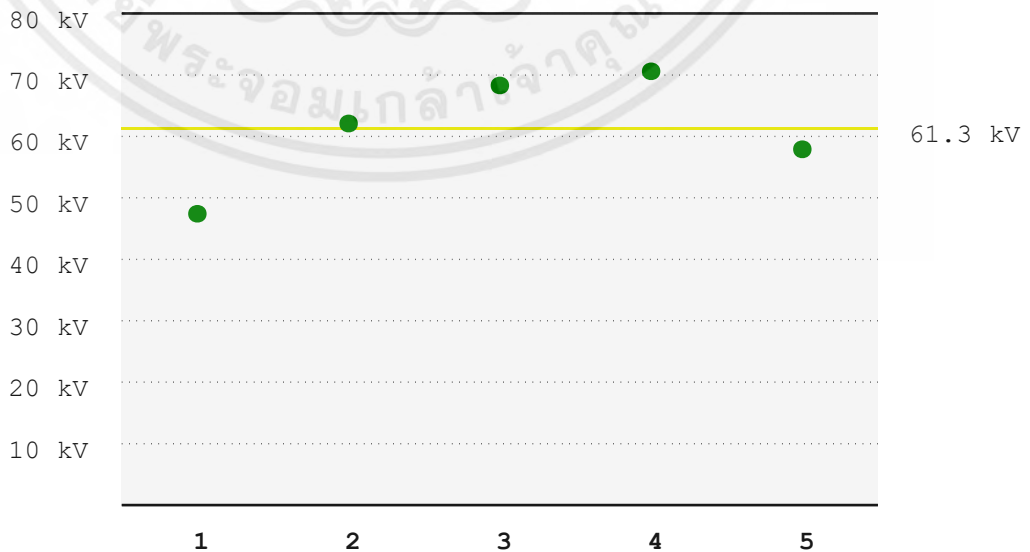
Range 23.2 kV

Std.Dev.Mean 15.1 %

Oil Temperature 25 °C

Test Frequency 60 Hz

Stirrer has been used during Test.



created by BA Control Center Report Engine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบค่าคงทนต่อแรงดันเบรกดาวร์ของน้ำมันปาล์มหลังการดูดซับที่ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร

Measurement Log / BA 80
BA80 19B025
GB5013.19B025
V3.23.3

ASTM D1816-12 : 1

Sample Number **BD test_Palm oil 1**

Comment

TEST START 2/6/2024 7:13:00 PM

Test 1	34.0 kV
Test 2	32.4 kV
Test 3	34.8 kV
Test 4	42.7 kV
Test 5	42.6 kV

TEST END 2/6/2024 7:27:00 PM all values (rms)

WITHIN RANGE LIMITS

Mean 37.3 kV

Std. Dev. 4.4 kV

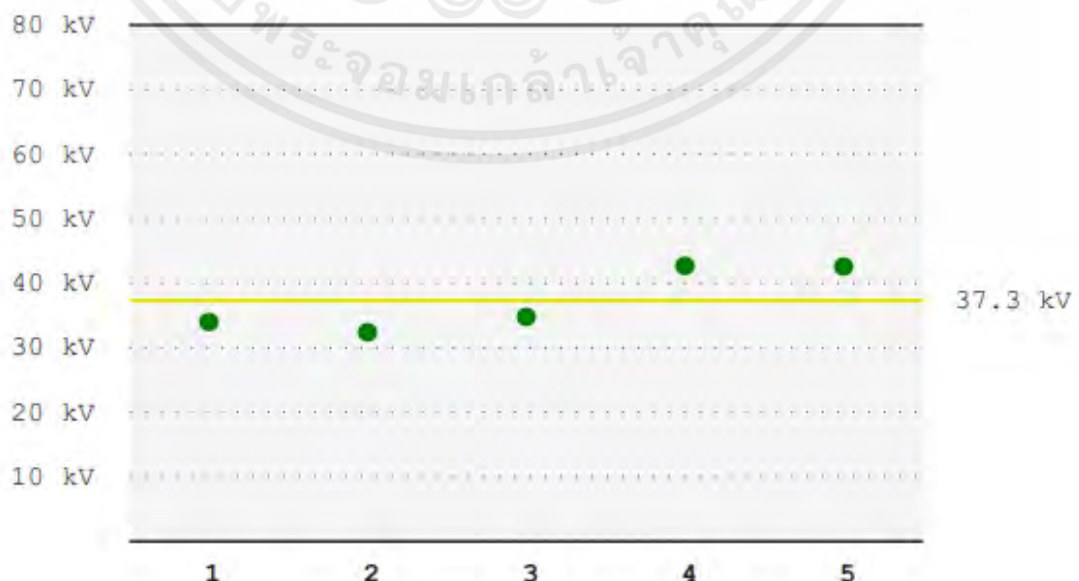
Range 10.3 kV

Std.Dev.Mean 13.3 %

Oil Temperature 26 °C

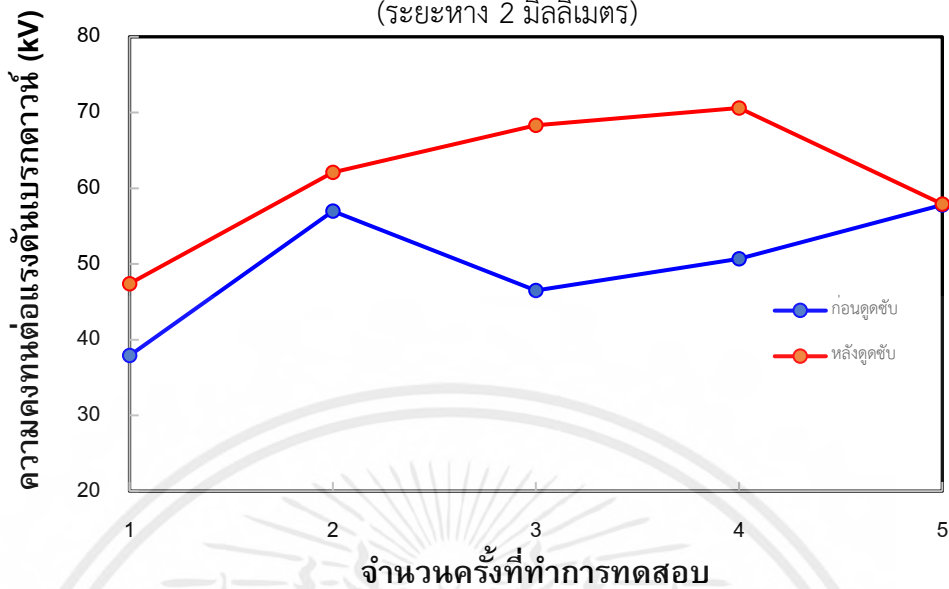
Test Frequency 60 Hz

Stirrer has been used during Test.



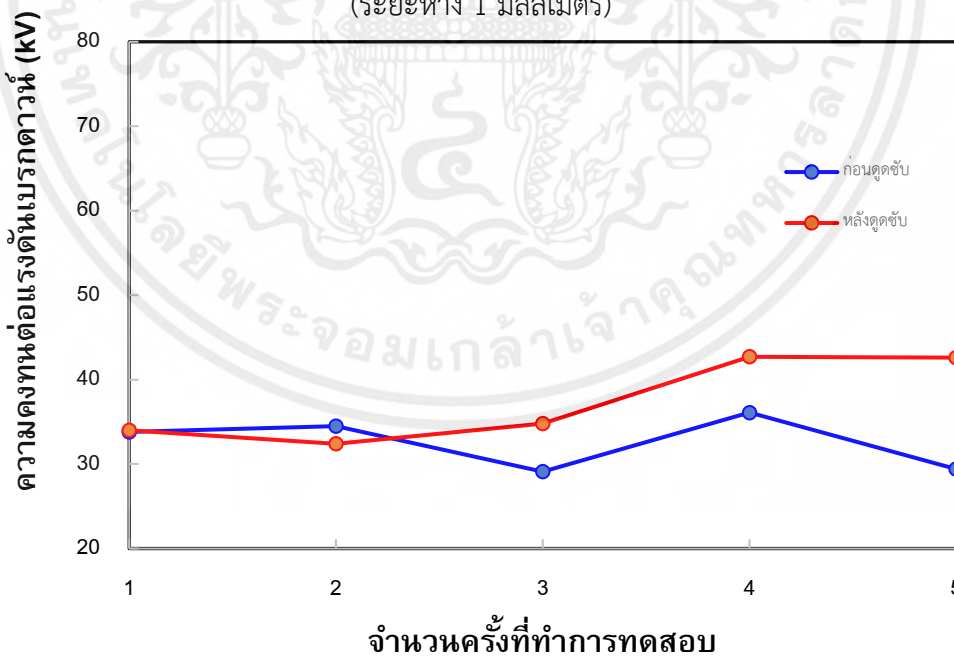
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์
(ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร)



รูปผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์
(ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร)



รูปผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวที่ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

สมมติฐานของการคำนวณ

ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในตัวดูดซับเริ่มต้นเป็นศูนย์

ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระมีค่าเท่ากันตลอดทั้งปริมาตร

ปริมาตรของน้ำมันเริ่มต้นมีค่าเท่ากับที่สมดุล

ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

$$q_e = 0.0371C_e$$

$$q_e = 371C_e$$

กำหนดให้ $q_e = \frac{m_{FFA}}{m_s}$ และ $m_{FFA} = m_{oil}(C - C_e)$

จะได้
$$\frac{m_{oil}(C - C_e)}{m_s} = q_e \quad (1)$$

แทนค่า $q_e = 371C_e$ ในสมการที่ 1

จะได้
$$\frac{m_{oil}(C - C_e)}{m_s} = 371C_e$$

จัดรูปสมการ
$$\frac{m_{oil}(C - C_e)}{371C_e} = m_s$$

เมื่อ	m_s	คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ต้องใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระ (กรัม)
	m_{oil}	คือ ปริมาณของน้ำมันที่ต้องการกำจัดกรดไขมันอิสระ (กรัม)
	m_{FFA}	คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (กรัม)
	C	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม (ppm)
	C_e	คือ ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่ต้องการที่จุดสมดุล (ppm)



ภาคผนวก ง
มาตรฐานสำหรับเอสเทอร์ธรรมชาติที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงคุณสมบัติของเอสเทอร์ธรรมชาติสำหรับใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า

FR3r™ Natural Ester fluid properties: standard acceptance values and typical values

PROPERTY	Standard test methods		ASTM D6871/IEEC C57.147	IEC 62770	FR3r™ Natural Ester	
	ASTM	ISO/IEC	As-received new fluid property requirements	Unused new fluid property requirements	TYPICAL	
Physical						
Color	D1500	ISO 2211	≤1.0	-	PASS	
Flash Point PMCC (°C)	D93	ISO 2719	-	≥250	260	
Flash Point COC (°C)	D92	ISO 2592	≥275	-	330	
Fire Point (°C)	D92	ISO 2592	≥300	>300	360	
Pour Point (°C)	D97	ISO 3016	<-10	≤-10	-33	
Density at 20°C (g/cm ³)	-	ISO 3675	-	≤1.0	0.92	
Relative Density (Specific Gravity) 15°C	D1298	-	≤0.96	-	0.92	
Viscosity (mm ² /sec)						
	100°C	D445	ISO 3104	≤15	≤15	8.0
	40°C			≤50	≤50	37
	0°C			≤500	-	225-235
	-20°C			-	-	850-950
Visual Examination	D1524	IEC 62770 4.2.1	bright and clear	clear, free from sediment and suspended matter	clear, light	
Biodegradation	OECD 301B		readily biodegradable	readily biodegradable	readily biodegradable	
Aquatic and Oral Acute Toxicity	OECD 202, 203, OECD 420		non-toxic	non-toxic	non-toxic	
Electrical						
Dielectric Breakdown (kV)	D877	-	≥30	-	>45	
Dielectric Breakdown (kV)						
	1mm gap	D1816	-	≥20	-	>25
	2mm gap	D1816	-	≥35	-	>50
	2.5mm gap	-	IEC 60156	-	≥35	>70
Dielectric Breakdown under Impulse (kV) 25.4mm gap	D3300	-	>130	-	136	
Gassing Tendency (ul/min)	D2300	-	≤0	-	≤0	
Dissipation Factor						
	25°C (%)	D924	-	≤0.20	-	0.010 - 0.15
	90°C (tan δ)	-	IEC 60247	-	≤0.05	0.01 - 0.03
	100°C (%)	D924	-	≤4.0	-	1.00 - 3.85
Chemical						
Corrosive Sulfur	D1275	IEC 62697	non-corrosive	non-corrosive	non-corrosive	
Water Content (mg/kg)	D1533	IEC 60814	≤200	≤200	<50	
Acid Number (mg KOH/g)	D974	IEC 62021.3	≤0.06	≤0.06	0.01 - 0.06	
PCB Content (mg/kg)	D4059	IEC 61619	not detectable	free from PCBs	not detectable	
Total Additives	-	IEC 60666	-	Max weight fraction 5%	<2%	
Oxidation Stability (48 hrs, 120°C)	-	IEC 61125 IEC 62770	-	-	-	
Total Acidity (mg KOH/g)	-	IEC 62621.3	-	≤0.6	0.1 - 0.2	
Viscosity at 40°C (mm ² /sec)	-	ISO 3104	-	≤30% increase over initial	18% - 25% increase	
Dissipation Factor at 90°C (tan δ)	-	IEC 60247	-	≤0.5	0.1-0.2	
Oxidation Induction Time 130°C/500psi (min)	D6186**	-	-	-	>94	

FR3r™ fluid is fully compatible with FR3™ fluid.

* Measurement of viscosity near pour point may be inaccurate.

** A more specific version of the test indicated by ASTM D6186 is under development.

NOTE: Specifications should be written referencing only the defined ASTM or IEC industry standard acceptance values and test methods. The listed 'typical' values are average values summarized from a significant number of data points over many years; they are not to be identified as acceptance values.

ASTM D6871 Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus.

IEC 62770: Fluids for electrotechnical applications – Unused natural esters liquids for transformers and similar electrical equipment.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้