

การเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพฐานปาล์มและกระดาษฉนวนภายใต้การป้อนแรงเชิงความร้อน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERIORATION OF PALM-BASED BIOTRANSFORMER OIL AND INSULATING PAPERS  
UNDER THERMAL AGING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพฐานพาล์มและ กระดาษฉนวนภายใต้การป้อนแรงเชิงความร้อน
โดย	นายพรพงษ์ ศิริรัตน์สกุล
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.บุญญาวัฒน์ อยู่สุข

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.บุญญาวัฒน์ อยู่สุข)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.พรประภา พิทักษ์จักรพิภพ)



# # 6372041623 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Thermal aging, Insulating paper, Transformer oil, palm oil, Palm oil  
 Pornpong Siriratsakul : DETERIORATION OF PALM-BASED BIOTRANSFORMER  
 OIL AND INSULATING PAPERS UNDER THERMAL AGING. Advisor: Prof.  
 NAPIDA HINCHIRANAN, Ph.D. Co-advisor: Boonyawan Yoosuk, Ph.D.

Currently, there are attempts to develop vegetable oils having biodegradability and non-toxicity to replace the use of the mineral oil. Palm-based oil (EnPAT) is one of the alternative vegetable oil which is developed as an insulating liquid for the transformer. While the transformer is operating, it has generated heat that affects the insulating liquid, and the insulating paper deteriorated. Therefore, this work focused on studying the characteristics of deterioration of palm-based oil with immersed paper insulation and compared to the mineral oil and a commercial natural ester (FR3) under thermal aging at 110, 130, and 150°C for different times in a sealed system. After thermal aging under nitrogen atmosphere, the EnPAT deteriorated. The moisture content and acidity tended to be increased, which were similar to those of FR3, but it was higher than that of mineral oil. Whereas the magnitude of dissolved decay content was the lowest. Furthermore, the dielectric breakdown voltage of aged EnPAT was higher than aged mineral oil. However, after thermal aging at 150 °C for 2,880 and 4,008 h. the retained tensile strength of insulating paper immersed in EnPAT was clearly higher than that of immersed in the mineral oil. Moreover, after thermal aging at 150 °C for 720 h. under oxygen atmosphere, that all oils were severe deterioration. However, the aged EnPAT had the highest dielectric breakdown voltage.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง "การเสื่อมสภาพของน้ำมันชีวภาพฐานปาล์มและกระดาดชนิดหนวภายใต้การบ่มเร่งเชิงความร้อน" สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิณชีระนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ดร.บุญญาวัฒน์ อยู่สุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำพร้อมทั้งคำปรึกษา ตลอดไปจนถึงข้อเสนอแนะที่ประโยชน์ต่อการทำวิจัยนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.พรประภา พิทักษ์จักรพิภพ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาให้คำชี้แนะ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ บุคลากรทุกท่านในทีมวิจัยเทคโนโลยีเชื้อเพลิงสะอาดและเคมีขั้นสูง ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่างๆในระหว่างการทำดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ ที่อำนวยความสะดวกเพื่อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ทดสอบและวิเคราะห์น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความสนับสนุน และความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์น้ำมันหม้อแปลง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณของบิดา มารดา ตลอดจนครอบครัว และผู้มีพระคุณทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนช่วยเหลือในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด

พรพงษ์ ศิริรัตน์สกุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 น้ำมันหม้อแปลง.....	5
2.2 น้ำมันแร่.....	7
2.3 เอสเทอร์ธรรมชาติ.....	9
2.3.1 เอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า.....	12
2.3.2 น้ำมันปาล์ม.....	13
2.3.3 น้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม.....	16
2.4 กลไกการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	19
2.4.1 กลไกการเสื่อมสภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	19
2.4.1.1 น้ำมันแร่.....	19

2.4.1.2 น้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติ .....	20
2.4.2 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน .....	21
2.4.3 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส .....	22
2.5 กระจาณนวนเซลลูโลส .....	23
2.6 กลไกการเสื่อมสภาพของกระจาณนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า .....	25
2.6.1 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน .....	25
2.6.2 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส .....	26
2.6.3 กลไกการเสื่อมสภาพจากไฟโรไลซิส .....	29
2.7 การวิเคราะห์ทดสอบการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลง .....	30
2.8 การวิเคราะห์ทดสอบการเสื่อมสภาพของกระจาณนวนเซลลูโลส .....	33
2.9 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง .....	34
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	39
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	39
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ .....	41
3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง .....	42
3.3.1 กระบวนการปรับสภาพ (pretreatment) ของน้ำมันหม้อแปลง .....	42
3.3.2 กระบวนการปรับสภาพของแถบเหล็กซิลิคอนและแถบทองแดง .....	42
3.3.3 กระบวนการปรับสภาพของกระจาณนวนเซลลูโลส .....	43
3.3.4 กระบวนการปรับสภาพของของผสม .....	43
3.3.5 กระบวนการบ่มเร่งเชิงความร้อน .....	44
3.4 การวิเคราะห์ทดสอบ .....	45
3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหม้อแปลง .....	45
3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลง .....	46



3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง .....	47
3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติของกระดาษฉนวนเซลลูโลส .....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	50
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหม้อแปลง .....	50
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงสี .....	50
4.1.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	50
4.1.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	55
4.1.2 ความหนืด .....	57
4.1.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	57
4.1.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	59
4.1.3 แรงตึงผิว .....	60
4.1.3.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	60
4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า .....	62
4.2.1 ปริมาณความชื้น .....	62
4.2.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	62
4.2.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	65
4.2.2 ค่าความเป็นกรด .....	66
4.2.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	66
4.2.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	68
4.2.3 ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันฉนวน .....	69
4.2.3.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	69
4.2.3.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	73
4.2.4 ปริมาณสารประกอบฟูแรน .....	73
4.2.4.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	75

4.2.5 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมัน .....	78
4.2.5.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	78
4.2.5.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	81
4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง.....	84
4.3.1 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	84
4.3.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	84
4.3.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	87
4.3.2 ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก.....	88
4.3.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	88
4.3.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	91
4.3.3 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์.....	92
4.3.3.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	92
4.3.3.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	95
4.3.4 ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า .....	95
4.3.4.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	96
4.3.4.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	99
4.4 การวิเคราะห์สมบัติของกระดาษฉนวนเซลลูโลส.....	100
4.4.1 การเปลี่ยนแปลงสี .....	100
4.4.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	100
4.1.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	101
4.4.2 ค่าความคงทนต่อแรงดึง.....	116
4.4.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	117
4.4.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	122
4.4.3 ค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซี .....	124

4.5 ลักษณะการเสื่อมสภาพและกลไกการปกป้องกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวน .....	126
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	131
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	131
5.1.1 พารามิเตอร์หลักที่ควรพิจารณาสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า .....	131
5.1.2 ลักษณะการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	131
5.1.3 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน .....	132
5.1.4 ลักษณะการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	133
5.1.5 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	134
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	134
บรรณานุกรม .....	135
ภาคผนวก ก .....	145
ก.1 อัตราส่วนของน้ำมันหม้อแปลง กระดาษฉนวนเซลลูโลส และโลหะที่ใช้ในการทดลอง .....	145
ก.2 การหาน้ำหนักแห้งและน้ำหนักหลังผ่านการอบของกระดาษฉนวนเซลลูโลส .....	146
ภาคผนวก ข .....	149
ข.1 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบต่างๆที่เกิดขึ้นในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ .....	149
ข.2 การคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ ..	152
ภาคผนวก ค .....	154
ค.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนเซลลูโลส .....	154
ค.2 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดึงเฉลี่ยของกระดาษฉนวนเซลลูโลส .....	154
ประวัติผู้เขียน .....	155

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ .....	6
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชแต่ละชนิด .....	12
ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะความแตกต่างของน้ำมันปาล์มแต่ละชนิด .....	15
ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลือง.....	16
ตารางที่ 2.5 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและแพคเกจกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ก่อนและหลังผ่านกรรมวิธีที่พัฒนาขึ้น.....	17
ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงชนิดน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT .....	18
ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเร่งด้วยความร้อน .....	45
ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน.....	54
ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบกับบรรยากาศออกซิเจน.....	56
ตารางที่ 4.3 ความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน .....	59
ตารางที่ 4.4 ปริมาณความชื้นของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน.....	65
ตารางที่ 4.5 ค่าความเป็นกรดของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน.....	68

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่ม เร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศ ไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน .....	73
ตารางที่ 4.7 สาเหตุการเกิดสารประกอบพวเรนชนิดต่างๆ .....	74
ตารางที่ 4.8 ปริมาณสารประกอบพวเรนของน้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิดหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ .....	77
ตารางที่ 4.9 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆ ใน FR3 และ EnPAT ก่อนการบ่มเร่งด้วย ความร้อน .....	79
ตารางที่ 4.10 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วย ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เทียบบรรยากาศออกซิเจน .....	87
ตารางที่ 4.11 ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศ ไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน .....	91
ตารางที่ 4.12 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบ บรรยากาศออกซิเจน .....	95
ตารางที่ 4.13 ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วย ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เทียบบรรยากาศออกซิเจน .....	99
ตารางที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจาก ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง ภายใ บรรยากาศไนโตรเจน.....	102
ตารางที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจาก ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5,016 ชั่วโมง ภายใ บรรยากาศไนโตรเจน.....	103



ตารางที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจน.....	113
ตารางที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจน.....	114
ตารางที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4,008 ชั่วโมง ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจน.....	115
ตารางที่ 4.28 ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาศนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจน.....	119
ตารางที่ 4.29 ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาศนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจน.....	120
ตารางที่ 4.30 ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาศนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจน.....	121
ตารางที่ 4.31 ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาศนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจนเทียบกับบรรยากาศออกซิเจน.....	123
ตารางที่ 4.32 ค่าระดับการเกิดพอลิเมอไรเซชันของกระดาศนวนที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ภายใต้อบรรยากาศไนโตรเจน.....	125
ตารางที่ ก1 อัตราส่วนของน้ำมันหม้อแปลง และกระดาศนวนที่ใช้ตามชนิดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	145
ตารางที่ ก2 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและร้อยละน้ำหนักแห้งของกระดาศนวนแต่ละชนิด.....	147
ตารางที่ ข1 พีคที่แสดงถึงองค์ประกอบที่พบใน FR3 และ EnPAT .....	149

## สารบัญรูปร่าง

### หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลต่างๆของน้ำมันแร่: (ก) พาราฟินิก (ข) แนฟทาสิก และ (ค) แอโรมาติก .	8
รูปที่ 2.2 ความสามารถในการย่อยสลายของน้ำมันฉนวนแต่ละชนิด .....	9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันแต่ละชนิด .....	11
รูปที่ 2.5 ผลของความชื้นต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงชนิดต่างๆ .....	12
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของผลปาล์มน้ำมัน .....	14
รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันแร่ .....	20
รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	21
รูปที่ 2.9 ชนิดกรดไขมันที่มีความอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวแตกต่างกัน .....	22
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเทอร์ธรรมชาติ.....	22
รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของของเซลลูโลส.....	24
รูปที่ 2.12 ชนิดของกระดาษฉนวนที่นิยมนำมาใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้า: (ก) กระดาษกราฟท์ และ (ข) กระดาษไดมอนด์ดอท .....	25
รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระดาษฉนวนเซลลูโลส.....	26
รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาษฉนวนเซลลูโลส.....	28
รูปที่ 2.15 การเกิดสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FAL และกรดอินทรีย์ต่างๆ ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาษฉนวน .....	29
รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของกระดาษฉนวนเซลลูโลส.....	30
รูปที่ 2.17 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบฟูแรนแต่ละชนิด (ก) 2-เฟอร์รัลดีไฮด์ (ข) 2-แอเซทิลฟูแรน (ค) 5-เมทิล-2-เฟอร์รัลดีไฮด์ (ง) 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์รัลดีไฮด์ และ (จ) 2-เฟอร์ฟิวรัล-แอลกอฮอล์ .....	32



รูปที่ 3.1 น้ำมันหม้อแปลงชนิดต่างๆ (ก) น้ำมันแร่ (ข) เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และ (ค) น้ำมันชีวภาพฐานพาล์ม (EnPAT).....	39
รูปที่ 3.2 กระจายฉนวนเซลลูโลสชนิดต่างๆ (ก) กระจายฉนวนชนิดกราฟท์ ความหนา 0.13 มม. (ข) กระจายฉนวนชนิดกราฟท์ ความหนา 0.18 มม. (ค) กระจายฉนวนชนิดไดมอนด์ ความหนา 0.18 มม. และ (ง) กระจายฉนวนชนิดกราฟท์ ความหนา 0.5 มม.....	40
รูปที่ 3.3 รูปแบบกระบวนการปรับสภาพของน้ำมันหม้อแปลง.....	42
รูปที่ 3.4 การจุ่มแช่ของกระจายฉนวนเซลลูโลส, แฉกเหล็กซิลิโคน และแฉกทองแดงลงในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิด .....	44
รูปที่ 3.5 การบรรจุท่อสแตนเลสแบบปิดภายในตู้อบลมร้อน .....	45
รูปที่ 4.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าความหนืดของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C.....	58
รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าแรงดึงผิวของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C.....	61
รูปที่ 4.3 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อปริมาณความชื้นของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C.....	64
รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าความเป็นกรดของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C.....	67
รูปที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนแสง UV ของ (ก) น้ำมันแร่ (ข) FR3 และ (ค) EnPAT ก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ (1) 110°C (2) 130°C และ (3) 150°C.....	71
รูปที่ 4.6 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C.....	72
รูปที่ 4.7 การเกิดสารประกอบฟูแรนชนิดต่างๆ.....	75
รูปที่ 4.8 โคโรมาโตแกรมขององค์ประกอบกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติ .....	78
รูปที่ 4.9 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT.....	80
รูปที่ 4.10 ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT.....	80

รูปที่ 4.11 ปริมาณไดกลีเซอไรด์ในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT.....	81
รูปที่ 4.12 ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT.....	81
รูปที่ 4.13 ปริมาณกรดไขมันชนิดต่างๆใน FR3 และ EnPAT ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 150°C นาน 720 ชม. ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน : (ก) กรดไขมันอิสระ (ข) มอนอกลิเซอไรด์ (ค) ไดกลีเซอไรด์ และ (ง) ไตรกลีเซอไรด์ .....	83
รูปที่ 4.14 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเร่งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C.....	86
รูปที่ 4.15 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเร่งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C .....	90
รูปที่ 4.16 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเร่งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C .....	94
รูปที่ 4.17 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเร่งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C.....	98
รูปที่ 4.18 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิดที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 150 องศาเซลเซียส นาน 2,880 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน : (ก) กระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. (ข) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. (ค) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์ทอ และ (ง) กระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม.....	128
รูปที่ 4.19 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิดที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 150 องศาเซลเซียส นาน 4,008 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน : (ก) กระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. (ข) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. (ค) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์ทอ และ (ง) กระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม.....	129
รูปที่ 4.20 ปฏิกริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของกระดาษฉนวน .....	130
รูปที่ ก1 อัตราส่วนของเหล็กซิลิคอน ทองแดง และน้ำมันฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า .....	146

รูปที่ ก2 ผล TGA ของ (ก) กระจาดขนาดความหนา 0.13 มม. (ข) กระจาดขนาดความหนา 0.18 มม. (ค) กระจาดขนาดความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์ทอ และ (ง) กระจาดขนาดความหนา 0.5 มม..... 148

รูปที่ ข1 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆในเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3)..... 150

รูปที่ ข2 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT)..... 151



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันจำนวนประชากรที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น และมีการขยายในเชิงเศรษฐกิจของภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ล้วนมีความต้องการต่อการใช้งานพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และทำให้เกิดการขับเคลื่อนการพัฒนา และการเพิ่มผลผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม โดยพลังงานไฟฟ้าถูกผลิตจากโรงงานไฟฟ้า แล้วส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมกับผู้ใช้งานก่อนที่จะส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเหล่านั้นไปตามบ้านเรือนของประชาชนหรือโรงงานอุตสาหกรรม ภายในหม้อแปลงไฟฟ้ามีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ แกนเหล็ก (core) ขดลวดตัวนำ (winding coil) และระบบฉนวนที่ประกอบด้วยน้ำมันและกระดาษ [1] ในระหว่างที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานจะเกิดความเค้นหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ความเค้นทางความร้อน ความเค้นทางไฟฟ้า และความเค้นทางเคมี [2] โดยความเค้นทางความร้อนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ น้ำมันหม้อแปลงเกิดการเสื่อมสภาพและสูญเสียสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ สมบัติในด้านการเป็นฉนวนทางไฟฟ้า (insulation) และสมบัติในการเป็นตัวกลางระบายความร้อน (cooling medium) [2] นอกจากนี้ยังทำให้ความเป็นฉนวนและความแข็งแรงเชิงกลของกระดาษมีค่าลดลง [2] จนในที่สุดกระดาษฉนวนเกิดการเปราะเสียหายขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าสั้นลง

ในปัจจุบันน้ำมันฉนวนที่นิยมนำมาใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย คือ น้ำมันแร่ (mineral oil) เนื่องจากมีราคาถูก มีสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าที่ดีเมื่อใช้ภายใต้ภาวะความเค้นทางความร้อนและทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามน้ำมันชนิดนี้มีข้อเสียหลายประการ เช่น ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติจึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และการกำจัดเป็นไปได้ยากเมื่อเกิดการรั่วไหลออกสู่ภายนอก นอกจากนี้ยังไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากน้ำมันแร่ได้มาจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม [3] อีกทั้งยังมีจุดวาบไฟ (flash point) และจุดติดไฟ (fire point) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 160 – 180 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดการลุกติดไฟและมีโอกาสเกิดการระเบิดของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น [4] จากปัญหาดังกล่าวในข้างต้น และในปัจจุบันหลากหลายประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญต่อผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอย่างมาก จึงมีงานวิจัยที่

นำเสนอไขมันพืชหรือเอสเทอร์ธรรมชาติ (natural ester) มาใช้เป็นน้ำมันทางเลือกให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (biodegradability) นอกจากนี้ยังมีจุดติดไฟและจุดวาบไฟที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส [4] ดังนั้นจึงมีความปลอดภัยต่อการเกิดอัคคีภัยของหม้อแปลงไฟฟ้าจากการลุกไหม้ของน้ำมันฉนวน แต่เอสเทอร์ธรรมชาติมีข้อจำกัดในการใช้เป็นน้ำมันฉนวน เช่น มีจุดไหลเท (pour point) และค่าความหนืดที่สูง นอกจากนี้มีความเสถียรต่อออกซิเจน (oxidation stability) น้อยเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ โดยข้อจำกัดเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดไขมัน ปริมาณความไม่อิ่มตัวและความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชแต่ละชนิด [5] ถ้าปริมาณความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันสูงส่งผลเกิดออกซิเดชันได้ง่าย แต่ถ้าปริมาณของกรดไขมันมีความไม่อิ่มตัวสูงจะทำให้ไขมันมีค่าความหนืดมากและมีจุดไหลเทสูง ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการแข็งตัวของน้ำมันที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ [6] ดังนั้นควรพิจารณาสัดส่วนองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีความไม่อิ่มตัวและความไม่อิ่มตัวภายในน้ำมันพืชให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

เอสเทอร์ธรรมชาติได้มาจากน้ำมันเมล็ดพืช ได้แก่ ทานตะวัน (sunflower) เรพซีด (rapeseed) แต่ที่นิยมนำมาใช้มาก คือ ถั่วเหลือง (soybean) โดยนำน้ำมันถั่วเหลืองเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพได้เป็นผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ธรรมชาติ โดยในตลาดปัจจุบันน้ำมันหม้อแปลงที่ผลิตจากเอสเทอร์ของน้ำมันถั่วเหลืองมีชื่อทางการค้าว่า “Envirotemp FR3” นิยมใช้เป็นฉนวนของเหลวในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (power transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (distribution transformer) [7] เมื่อพิจารณาพืชน้ำมันที่เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชอีกชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจที่จะนำไปพัฒนาเป็นน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าชีวภาพ เนื่องจากประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มได้เป็นจำนวนมากถึง 15.66 ล้านตัน [8] และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าแก่น้ำมันปาล์มให้สูงขึ้นนอกจากการนำมาใช้ประกอบอาหาร นอกจากนี้ยังเป็นการแก้ปัญหา น้ำมันปาล์มล้นตลาดในประเทศ อย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้งานเป็นระยะเวลานานภายหลังจากการติดตั้งหม้อแปลงแล้ว ดังนั้นการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนและกระดาษฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงจึงเป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาผลของการบ่มเร่งเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ณ ช่วงเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและบรรยากาศออกซิเจน ต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันหม้อ

แปลงชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ที่พัฒนาโดยทีมวิจัยศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (ENTEC) ภายใต้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) [9] ร่วมกับการศึกษาการเสื่อมสภาพของกระดาศนวนเซลลูโลสที่จุ่มแช่ในน้ำมันหม้อแปลงทั้ง 3 ชนิดภายหลังจากการบ่มเร่งเชิงความร้อน เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการปกป้องกระดาศนวนของน้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิด

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเสื่อมสภาพของน้ำมันแร่กับเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ภายหลังจากการบ่มเร่งเชิงความร้อนในด้านสมบัติทางกายภาพ เคมี และไฟฟ้า
2. เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาศนวนเซลลูโลสที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่กับเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะการเสื่อมสภาพของน้ำมันแร่ เอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ด้วยการบ่มเร่งเชิงความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ (110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาการบ่มเร่งที่แตกต่างกัน (720, 1,440, 2,016, 2,880, 4,008, 5,016 และ 6,000 ชั่วโมง) ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่คงที่และแสงสว่าง
2. ศึกษาลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาศนวนเซลลูโลสที่จุ่มแช่ในน้ำมันหม้อแปลงทั้ง 3 ชนิด ภายหลังจากการบ่มเร่งเชิงความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ
3. ศึกษากลไกที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงและกระดาศนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิดหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบในด้านสมบัติทางกายภาพ เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันแร่กับ เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพฐานพาล์ม (EnPAT) ทั้ง ก่อนและหลังการบ่มเร่งเชิงความร้อน
2. ผลการเปรียบเทียบการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนเซลลูโลสที่จุ่มแช่ในน้ำมันหม้อแปลงทั้ง 3 ชนิดภายหลังการบ่มเร่งเชิงความร้อน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยปกติหม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานมากกว่า 30 ปีขึ้นไป [10] อย่างไรก็ตามพบว่าความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนมากมาจากความเสื่อมโทรมหรือความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งส่วนหนึ่งที่มีสำคัญในหม้อแปลงไฟฟ้า คือ ระบบฉนวน (insulation system) เนื่องจากในระหว่างการใช้งานระบบฉนวนจะต้องอยู่ภายใต้ความกดดันต่างๆ เช่น โหลดไฟฟ้าและความร้อนสูง [11] ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานและอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง โดยทั่วไประบบฉนวนของหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฉนวนที่เป็นของเหลว (liquid insulation) และฉนวนที่เป็นของแข็ง (solid insulation)

#### 2.1 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลง (transformer oil) เป็นฉนวนที่เป็นของเหลว ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการระบายความร้อน (cooling medium) โดยการดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นจากแกนเหล็กและขดลวดตัวนำที่อยู่ภายในหม้อแปลง ก่อนถ่ายเทออกสู่พื้นผิวภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นฉนวน (insulate) เพื่อป้องกันชิ้นส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกัน ไม่ให้เกิดการลัดวงจร [12] อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันบนพื้นผิวของวัสดุโลหะภายในหม้อแปลง นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการตรวจสอบสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [13] และช่วยปกป้องกระดาษที่เป็นฉนวนของแข็ง โดยน้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่ป้องกันกระดาษฉนวนกับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากความชื้นและออกซิเจน [14] ซึ่งของเหลวที่เหมาะสมสำหรับจะนำมาใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าควรมีสมบัติดังต่อไปนี้ [1]

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) มีค่าสูง
2. สภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) มีค่าสูง
3. ปัจจัยกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric dissipation factor) มีค่าต่ำ
4. มีความเสถียรทางเคมีที่ดี
5. มีความหนืดต่ำ
6. สารระเหยง่ายมีปริมาณน้อย และจุดวาบไฟสูง



7. ติดไฟยาก และไม่มีพิษ
8. มีราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ง่าย

อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ยากที่ของเหลวชนิดหนึ่งจะมีสมบัติครบตามดังกล่าวในข้างต้น ซึ่งเป็นที่สังเกตว่าสมบัติบางอย่างอาจมีความขัดแย้งกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า น้ำมันแร่เป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำและปัจจัยกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าน้อย แต่มีจุดวาบไฟและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ในขณะที่เอสเทอร์ธรรมชาติมีจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่อุณหภูมิสูง แต่กลับมีความหนืดและปัจจัยกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามน้ำมันทั้ง 2 ชนิดนี้ถูกนำมาใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงเช่นเดียวกัน

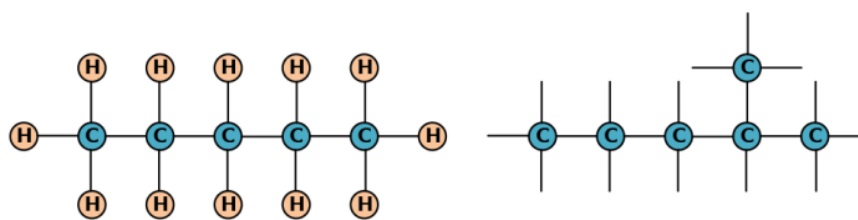
**ตารางที่ 2.1** มาตรฐานของน้ำมันหม้อแปลงสำหรับน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติ [15, 16]

สมบัติ	มาตรฐานน้ำมันหม้อแปลงสำหรับน้ำมันแร่ (IEC 60296)	มาตรฐานน้ำมันหม้อแปลงสำหรับเอสเทอร์ธรรมชาติ (IEC 62770)
ความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °C	ไม่เกิน 12 เซนติสโตก	ไม่เกิน 50 เซนติสโตก
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	อย่างน้อย 30 กิโลโวลต์	อย่างน้อย 35 กิโลโวลต์
ปัจจัยกำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 90 °C	ไม่เกิน 0.005	ไม่เกิน 0.05
จุดวาบไฟ	อย่างน้อย 150 °C	อย่างน้อย 300 °C
จุดติดไฟ	ไม่ระบุ	อย่างน้อย 250 °C
จุดไหลเท	ไม่เกิน -40 °C	ไม่เกิน -10 °C

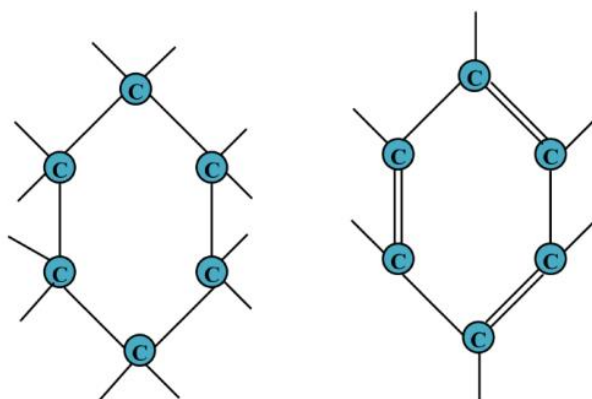
## 2.2 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นของเหลวฉนวนที่เรื่อนำมาใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้าครั้งแรก ใน ค.ศ. 1885 โดยบริษัท General Electric [17] โดยน้ำมันชนิดนี้ได้มาจากกรกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ด้วยกระบวนการกลั่นลำดับส่วน (fractional distillation) ได้ออกมาเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้าง 3 ชนิด ได้แก่ พาราฟินิก (paraffinic) แนฟทานิก (naphthenic) และแอโรมาติก (aromatic) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติทางกายภาพ เคมี และไฟฟ้า [18] โดยพาราฟิน ( $C_nH_{2n+2}$ ) และแนฟทานิก ( $C_nH_{2n}$ ) จัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความอิ่มตัว ขณะที่แอโรมาติก ( $C_nH_{2n-6}$ ) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว [19] นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจน ในปริมาณเล็กน้อย จากส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลที่มีความแตกต่างกันสามารถแบ่งชนิดน้ำมันแร่สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า 3 ชนิดดังนี้ [17]

1. น้ำมันแร่ชนิดพาราฟินิก เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบของพาราฟินิกมากกว่า 60% โดยน้ำหนัก มีสมบัติเด่น คือ เกิดออกซิเดชันยาก แต่มีจุดไหลเหสูงจึงต้องมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อลดจุดไหลเหให้มีค่าต่ำลง และมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย
2. น้ำมันแร่ชนิดแนฟทานิก เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบของแนฟทานิกมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก มีสมบัติเด่น คือ มีค่าจุดไหลเหต่ำ และมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี แต่เกิดออกซิเดชันได้ง่ายจึงต้องมีการเติมสารช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (oxidation inhibitor) เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของน้ำมันแร่ ซึ่งใช้ในปัจจุบันนิยมนำน้ำมันแร่ชนิดนี้มาใช้งาน
3. น้ำมันแร่ชนิดแอโรมาติก เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบของแอโรมาติกมากกว่า 35% โดยน้ำหนัก มีสมบัติเด่น คือ มีความสามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน และมีความสามารถในการดูดซึมแก๊สได้ดี แต่ปัจจุบันไม่นิยมนำมาใช้งานแล้วเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง



(ก)



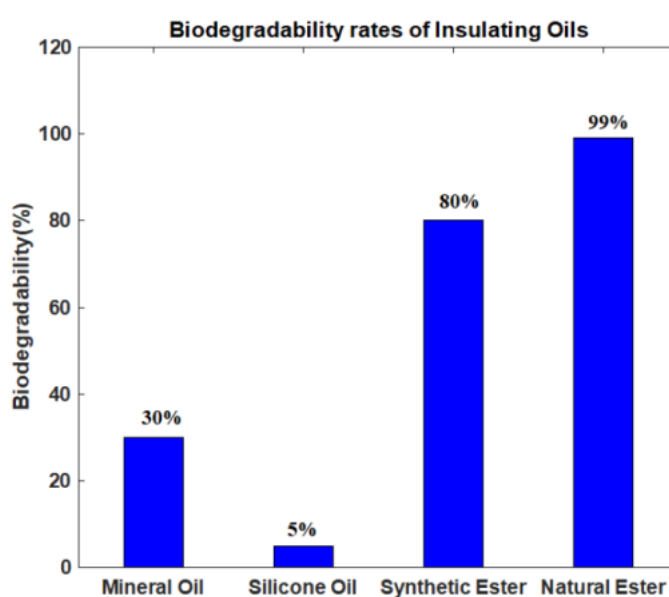
(ข)

(ค)

**รูปที่ 2.1** โครงสร้างโมเลกุลต่างๆของน้ำมันแร่: (ก) พาราฟินิก (ข) แนฟทาสิก และ (ค) แอโรมาติก [20]

น้ำมันแร่นิยมนำมาใช้เป็นน้ำมันฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถเข้ากับกระดาษฉนวนที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนของแข็งภายในหม้อแปลงได้ดี นอกจากนี้ยังสมบัติทางกายภาพและสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี [20] เช่น ค่าความหนืดต่ำจึงทำให้สามารถระบายความร้อนได้ดี และมีจุดไหลเทต่ำมาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพที่อุณหภูมิตำหรือสภาพอากาศหนาว ถึงแม้ว่าน้ำมันแร่จะมีข้อดีหลากหลาย และนำมาใช้กันจนถึงในปัจจุบัน แต่น้ำมันแร่ก็มีข้อจำกัดมากเช่นกัน คือ ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เนื่องจากระดับความสามารถในการย่อยสลายตามธรรมชาติของน้ำมันแร่มีค่าน้อยกว่า 30% ดังแสดงในรูปที่ 2.2 อีกทั้งยังไม่สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การผลิตน้ำมันแร่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นถ้าเกิดการรั่วไหลจะทำให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่พื้นดินและแม่น้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บริเวณนั้น นอกจากนี้ น้ำมันแร่มีจุดวาบไฟและจุดติดไฟต่ำประมาณ 160-180 องศาเซลเซียส จึงมีโอกาสการลุกติดไฟได้ง่าย เมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้หรือเกิดการระเบิดของหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินและบ้านเรือนประชาชนที่อยู่บริเวณโดยรอบ [4, 21]

อีกทั้งน้ำมันแร่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อย ดังนั้นปริมาณน้ำเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลทำให้ค่าความคงต่อแรงดันไฟฟ้า (breakdown voltage) ลดลงอย่างรวดเร็ว [22] จากผลเสียของน้ำมันแร่ดังกล่าวมาข้างต้นล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ซึ่งในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกให้ความสนใจต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นจึงกระตุ้นให้นักวิจัยพยายามที่จะค้นหาน้ำมันชนิดอื่นๆ เพื่อทดแทนการใช้ น้ำมันแร่ โดยสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีจำนวนมากอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งวัตถุดิบทางธรรมชาติที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นน้ำมันหม้อแปลง คือ น้ำมันพืช

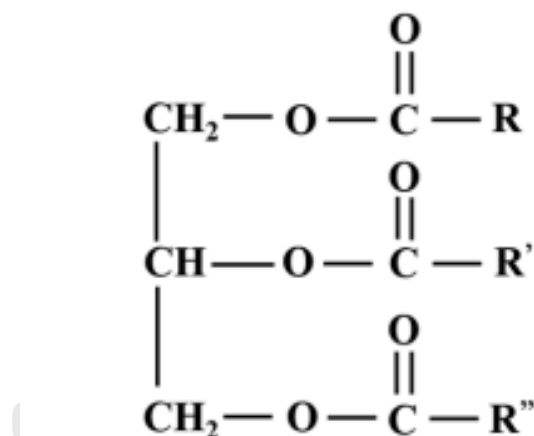


รูปที่ 2.2 ความสามารถในการย่อยสลายของน้ำมันฉนวนแต่ละชนิด [23]

### 2.3 เอสเตอร์ธรรมชาติ

น้ำมันพืชหรือเอสเตอร์ธรรมชาติ ได้มาจากส่วนเมล็ดและดอกของพืชชนิดต่างๆ เช่น งา (sesame) ทานตะวัน (sunflower) ถั่วเหลือง (soy bean) มะกอก (olive) และปาล์ม (palm) โดยเอสเตอร์ธรรมชาติมีโครงสร้างทางเคมีที่เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ที่ประกอบด้วย กลีเซอรอล (glycerol) และกรดไขมัน (fatty acids) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [24] กรดไขมันมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนและปริมาณความไม่อิ่มตัวแตกต่างกัน ซึ่งกรดไขมันนิยมที่พบในน้ำมันพืชแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ [25]

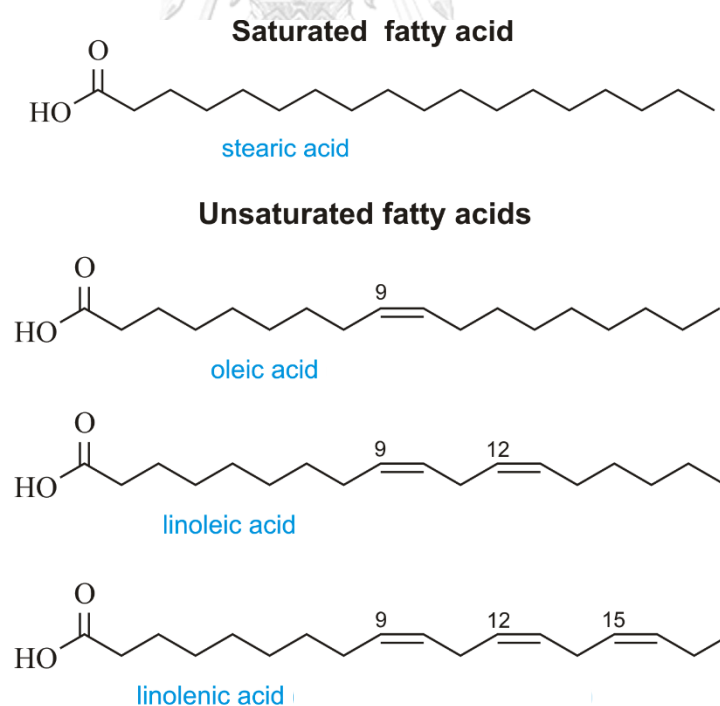
1. กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acids) จะไม่มีพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน ได้แก่ กรดปาล์มิติก (palmitic acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และกรดสเตียริก (stearic acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม
2. กรดไขมันไม่อิ่มตัวตำแหน่งเดียว (monounsaturated fatty acids) โดยมีพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน 1 ตำแหน่ง ได้แก่ กรดโอเลอิก (oleic acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม
3. กรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (polyunsaturated fatty acids) โดยมีพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนมากกว่า 1 ตำแหน่ง ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม และพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง ส่วนกรดลิโนเลนิก (linolenic acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอมและพันธะคู่ 3 พันธะ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอสเทอร์ธรรมชาติ [6]

โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันแต่ละชนิดแสดงในรูปที่ 2.4 น้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ และเคมีของน้ำมันพืช [26] กรณีที่น้ำมันพืชมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวมากจะทำให้ไขมันพืชดังกล่าวมีความเสถียรสูงต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่มีค่าความหนืดและมีจุดไหลเทสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการแข็งตัวของน้ำมันที่อุณหภูมิไม่ต่ำมากนัก ขณะที่น้ำมันพืชที่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวมาก น้ำมันจะมีความหนืดต่ำ แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดออกซิเดชันได้ง่าย ดังนั้นจึงควรพิจารณาองค์ประกอบ

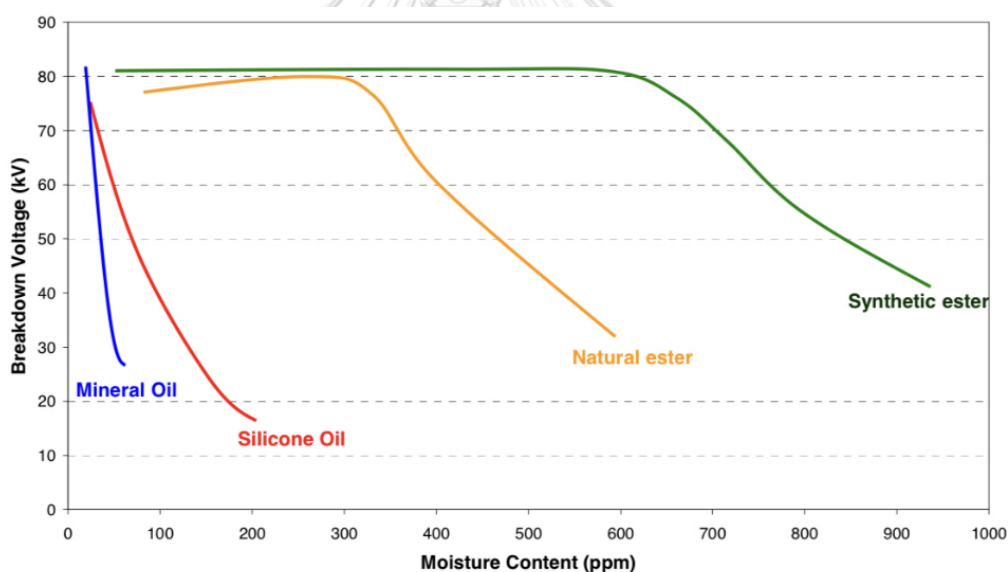
ของกรดไขมัน ปริมาณความอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของน้ำมันพืชที่จะนำมาใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีความเหมาะสม เอสเทอร์ธรรมชาติมีสมบัติที่โดดเด่นกว่าน้ำมันแร่หลายประการ เช่น สามารถย่อยทางตามธรรมชาติได้สูง (มากกว่า 99%) จึงไม่มีพิษ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังต้านทานการติดไฟได้ดี เนื่องจากมีจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีความปลอดภัยจากการเกิดอัคคีภัย นอกจากนี้เอสเทอร์ธรรมชาติยังสามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าน้ำมันแร่ประมาณ 20 – 30 เท่า ดังนั้นจึงทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และยังช่วยทำให้กระดาศนวนที่อยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้ายังคงแห้ง ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของกระดาศให้ยาวนานขึ้น [27] อย่างไรก็ตามเอสเทอร์ธรรมชาติก็มีข้อจำกัด คือการเกิดออกซิเดชันง่าย ดังนั้นการนำไปใช้งานควรทำในระบบปิดผนึกสนิท (hermetical sealing) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ นอกจากนี้อาจมีการเติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน เพื่อช่วยปรับปรุงเสถียรภาพต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งจะส่งผลให้น้ำมันหม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น [28]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันแต่ละชนิด [25]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชแต่ละชนิด [6]

ชนิดน้ำมันพืช	กรดไขมันอิ่มตัว		กรดไขมันไม่อิ่มตัว	กรดไขมันไม่อิ่มตัว
			ตำแหน่งเดียว	หลายตำแหน่ง
	กรดปาล์มติก (C16:0)	กรดสเตียริก (C18:0)	กรดโอเลอิก (C18:1)	กรดลิโนเลอิก (C18:2)
น้ำมันปาล์ม	45%	4%	40%	10%
น้ำมันมะกอก	11%	3%	71%	10%
น้ำมันเรพซีด	4%	2%	62%	22%
น้ำมันทานตะวัน	7%	5%	19%	68%
น้ำมันถั่วเหลือง	11%	4%	24%	54%



รูปที่ 2.5 ผลของความชื้นต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงชนิดต่างๆ [4]

### 2.3.1 เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงการค้า

ทุกวันนี้ตัวเลือกจากผลิตภัณฑ์เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงพาณิชย์มีจำนวนมากที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากเอสเตอร์ธรรมชาติภายใต้ชื่อเชิงการค้า คือ BIOTEMP ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1999 โดยบริษัท ABB [29] ซึ่งผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ถูกผลิตมาจากน้ำมันที่มีปริมาณกรดโอเลอิกสูงอย่างน้อย 80% เช่น น้ำมันจากดอกทานตะวัน น้ำมันเรพซีด

พร้อมทั้งมีการเติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant) ในปริมาณเล็กน้อย มีสมบัติเด่น คือ มีลักษณะการเป็นฉนวนที่ดีมากและความเสถียรทางความร้อนสูง อีกทั้งยังมีจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่สูงถึง 330 และ 360 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จึงทำให้สามารถใช้ได้กับทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ในร่มและกลางแจ้งได้ นอกจากนี้ยังสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติได้ถึง 97% ในเวลาเพียง 21 วัน จึงไม่มีปัญหาเรื่องการกำจัด และยังสามารถเข้ากับวัสดุฉนวนของแข็งภายในหม้อแปลงได้ดี ส่วนเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้าอีกชนิดหนึ่งมีชื่อว่า Envirotemp FR3 ที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Cooper Industries Inc [30] ในปี ค.ศ. 2000 ซึ่งผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ผลิตมาจากน้ำมันถั่วเหลืองที่มีปริมาณของกรดโอเลอิก 29% [31] พร้อมทั้งยังมีการปรับปรุงสมบัติให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้วยการเติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน สารสี สารลดจุดไหลเท (pour point depressant) และสารยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (antimicrobial agent) และน้ำมันชนิดนี้ปราศจากซิลิโคน ไพโตรเลียม และการกักกรองของซัลเฟอร์หรือธาตุฮาโลเจน ดังนั้นจึงไม่มีความเป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความไวไฟต่ำ และยังมีจุดวาบไฟที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าน้ำมันแร่ประมาณ 2 เท่า ดังนั้นจึงติดไฟยากเมื่อจะต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูง แต่ BIOTEMP และ Envirotemp FR3 ไม่เหมาะกับการใช้งานในสถานที่หนาวเย็นจัด เนื่องจากน้ำมันทั้ง 2 ชนิดนี้มีจุดไหลเทสูงที่อุณหภูมิ -18 และ -21 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่น้ำมันแร่มีจุดไหลเทต่ำกว่าที่อุณหภูมิ -45 องศาเซลเซียส โดยเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้าทั้ง 2 ชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้กับหม้อแปลงกำลังขนาดเล็กและหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายทั่วทั้งสหรัฐอเมริกา อีกทั้งยังดำเนินการปรับปรุงเพื่อให้นำไปใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ได้อย่างแพร่หลาย

### 2.3.2 น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มเป็นเอสเทอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย และประเทศไทยได้เป็นจำนวนมาก โดยมีสีค่อนข้างแดง เนื่องจากมีปริมาณของเบต้าแคโรทีนสูง โดยน้ำมันชนิดนี้สกัดมาจากส่วนหนึ่งของต้นปาล์มน้ำมันที่เรียกว่า ผลปาล์ม (palm nut) ที่ประกอบด้วยส่วนของเมล็ดภายในที่เรียกว่า แก่นปาล์ม (kernel) ที่หุ้มด้วยเปลือกแข็งสีดำที่เรียกว่า กะลา (endocarp) ซึ่งถูกรายล้อมไปด้วยชั้นที่มีลักษณะเส้นใยที่เรียกว่า เปลือกหุ้มภายนอก (mesocarp) ดังแสดงในรูปที่ 2.6





รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของผลปาล์มน้ำมัน

โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มที่ได้จากผลปาล์มจะแบ่งออกเป็น 5 ชนิดที่มีลักษณะแตกต่างกัน [32] ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยน้ำมันปาล์มจะมีปริมาณของกรดไขมันในช่วงกว้างที่มีจำนวนคาร์บอน ตั้งแต่ 8 – 18 อะตอม เมื่อเทียบกับน้ำมันจากถั่วเหลืองที่มีปริมาณของกรดไขมันในช่วงแคบโดยมีจำนวนคาร์บอน 16 – 18 อะตอมเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยจะเห็นได้ว่าน้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 8 – 16 อะตอม ซึ่งที่จัดเป็นกรดไขมันแบบอิ่มตัวปริมาณมากจึงมีความเสถียรต่อออกซิเจนที่เหนือกว่าน้ำมันที่องค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวปริมาณมาก [33] แต่องค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวดังกล่าวส่งผลทำให้น้ำมันปาล์มมีสถานะเป็นของกึ่งแข็ง (semisolid) ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความหนืดและจุดไหลเทสูง แต่สำหรับน้ำมันปาล์มที่มีความเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นของเหลวฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า คือ น้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ (redefined bleached and deodorized palm oil: RBDPO) เนื่องจากมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวใกล้เคียงกัน แต่ยังมีสมบัติทางไฟฟ้าไม่ดึกดำบรรพ์เมื่อเทียบกับเอสเทอร์ธรรมชาติอื่นๆ

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะความแตกต่างของน้ำมันปาล์มแต่ละชนิด [32]

ชนิดของน้ำมันปาล์ม	รายละเอียด
น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil: CPO)	<p>ได้มาจากส่วนของเปลือกหุ้มภายนอกของผลปาล์ม โดยผ่าน 4 กระบวนการดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● การอบทะเลายด้วยไอน้ำ(sterilization)</li> <li>● การแยกผล (stripping)</li> <li>● การสกัดน้ำมัน (extraction)</li> <li>● การทำให้บริสุทธิ์ (purification)</li> </ul>
น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil: PKO)	<p>ได้มาจากส่วนของเนื้อในเมล็ดของผลปาล์มโดยผ่าน 2 กระบวนการดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● การคัดแยก (separation)</li> <li>● การอบแห้ง (drying)</li> </ul>
น้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ (redefined, bleached and deodorized palm oil: RBDPO)	<p>ได้มาจากการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบโดยผ่าน 3 กระบวนการดังนี้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● การกำจัดกัม (degumming)</li> <li>● การฟอกสี (bleaching)</li> <li>● การกำจัดกลิ่น (deodorization)</li> </ul> <p>นอกจากนี้ยังสามารถนำมาเข้าสู่การกลั่นแยกส่วน (fractionation) เพื่อผลิตน้ำมันปาล์มโอเลอิน (RBDPO olein)</p>
เอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid ester: PFAE)	<p>ได้มาจากกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวของน้ำมันปาล์ม ซึ่งถูกสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคการออกแบบโมเลกุลและผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (fatty acid methyl ester) และอัลคิลแอลกอฮอล์ (alkyl alcohol)</p>

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลือง [33]

ชนิดกรดไขมัน	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันปาล์ม	
		น้ำมันปาล์มดิบ	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม
C8: กรดคาไพโรลิก (caprylic acid)	-	-	3.3%
C10: กรดคาพริก (capric acid)	-	-	3.1%
C12: กรดลอริก (lauric acid)	-	-	45.7%
C14: กรดไมริสติก (myristic acid)	-	1.1%	16.4%
C16: กรดปาล์มิติก (palmitic acid)	6.7%	44.4%	8.9%
C18: กรดสเตียริก (stearic acid)	3.3%	4.3%	2.3%
C18: กรดโอเลอิก (oleic acid)	41.7%	39.9%	17.1%
C18: กรดลิโนเลอิก (linoleic acid)	41.3%	9.4%	2.7%
C18: กรดลิโนเลนิก (linolenic acid)	5.9%	-	-
อื่นๆ	1.1%	0.9%	0.5%

### 2.3.3 น้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม

ทีมวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ ภายใต้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้ทำการค้นคว้าและพัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าชีวภาพชนิดติดไฟจากจากน้ำมันปาล์มขึ้น กระบวนการที่ทีมวิจัยพัฒนาขึ้นนี้อยู่ระหว่างกระบวนการยื่นรับความคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาในชื่อ “กรรมวิธีการเพิ่มค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันที่ได้จากพืชเพื่อใช้งานในหม้อแปลงไฟฟ้า” [9] โดยกระบวนการที่พัฒนาขึ้นเน้นไปที่การเพิ่มความเป็นฉนวนไฟฟ้าให้กับน้ำมัน ทั้งนี้ความเป็นฉนวนไฟฟ้าเป็นสมบัติหลักที่สำคัญอย่างมากของน้ำมันหม้อแปลงตามมาตรฐาน IEC

62770 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ระบุในข้อกำหนดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบติดไฟยาก (Specification no.236) จะกำหนดค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าชีวภาพด้วย 2 ค่า ดังนี้

- 1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric breakdown voltage: DBV) เป็นค่าความต่างศักย์ที่ต่ำที่สุดที่ทำให้น้ำมันสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ดีจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง
- 2) แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric dissipation factor) เป็นค่าที่แสดงการเสื่อมสภาพการเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมัน ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ดีแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกควรมีค่าต่ำ

จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า กรรมวิธีตามการประดิษฐ์มีประสิทธิภาพอย่างมากในการเพิ่มค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ให้มีความเหมาะสมในการใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าชีวภาพชนิดติดไฟยากจากน้ำมันปาล์มที่พัฒนาขึ้นโดยมีชื่อเรียกว่า EnPAT ซึ่งมีสมบัติเทียบกับมาตรฐาน ASTM D6871 และ IEC 62770 และน้ำมันหม้อแปลงชีวภาพ FR3 ดังแสดงในตารางที่ 2.6 แต่ค่าจุดไหลเทที่ 6 องศาเซลเซียส ยังมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของน้ำมันปาล์ม ทั้งนี้ค่าจุดไหลเทที่ 6 องศาเซลเซียส ไม่น่าจะก่อให้เกิดปัญหาเมื่อใช้งานในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศในเขตร้อน

**ตารางที่ 2.5** ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ก่อนและหลังผ่านกรรมวิธีที่พัฒนาขึ้น

ชนิดน้ำมัน	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ≥ 35 kV ตามมาตรฐาน IEC 62770		แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ≤ 0.05 ตามมาตรฐาน IEC 62770	
	ไม่ผ่าน กระบวนการ	หลังผ่าน กระบวนการ	ไม่ผ่าน กระบวนการ	หลังผ่าน กระบวนการ
น้ำมันปาล์ม	26.3	71.9	0.1340	0.0177
น้ำมันถั่วเหลือง	23.3	68.9	0.0189	0.0102
น้ำมันทานตะวัน	36.5	75.4	0.0450	0.0147

**ตารางที่ 2.6** สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงชนิดน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT

สมบัติต่างๆ	หน่วย	มาตรฐานวิธีการทดสอบ		ข้อจำกัด		น้ำมันแร่	FR3	EnPAT
		ASTM D6871	IEC 62770	ASTM D6871	IEC 62770			
สี	-	ASTM D1500	ISO 2211	≤ 1.0	-	< 0.5	< 0.5	1
จุดวาบไฟ แบบ PMCC	°C	ASTM D93	ISO 2719	-	≥ 250	150	255	280
จุดวาบไฟ แบบ COC	°C	ASTM D92	ISO 2592	≥ 275	-	-	320-330	325
จุดติดไฟ	°C	ASTM D92	ISO 2592	≥ 300	≥ 300	170 - 180	350-360	345
จุดไหลเท	°C	ASTM D97	ISO 3016	≤ -1.0	≤ -1.0	-51	-20	6
ความหนืดที่ 15 °C	-	ASTM D1298	-	≤ 0.96	-	0.83	0.912	0.914
ความหนืดที่ 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445	ISO 3104	≤ 50	≤ 50	8.1	33.55	40.28
ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏ	-	ASTM D1524	IEC 62770 4.2.1	สีใส	ปราศจากตะกอน	สีใส ปราศจากตะกอน	สีขี้เวย ปราศจากตะกอน	สีเหลืองใส ปราศจากตะกอน
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า: ระยะห่าง 2.5 mm.	kV	-	IEC 60256	-	≥ 35	67.9	> 100	>100
ค่าแพคเกจอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ 90 °C	-	-	IEC 60247	-	≤ 0.05	0.69x10 <sup>-3</sup>	3.32x10 <sup>-3</sup>	16.6x10 <sup>-3</sup>
ปริมาณความชื้น	ppm	ASTM D1533	IEC 60814	≤ 200	≤ 200	10	38	28
ความเป็นกรด	mg•KOH/g	ASTM D974	IEC 62021.3	≤ 0.06	≤ 0.06	0.009	0.029	0.021
ความเสถียรต่อออกซิเจน	h	-	EN 15751	-	-	-	11.9	26.7

## 2.4 กลไกการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

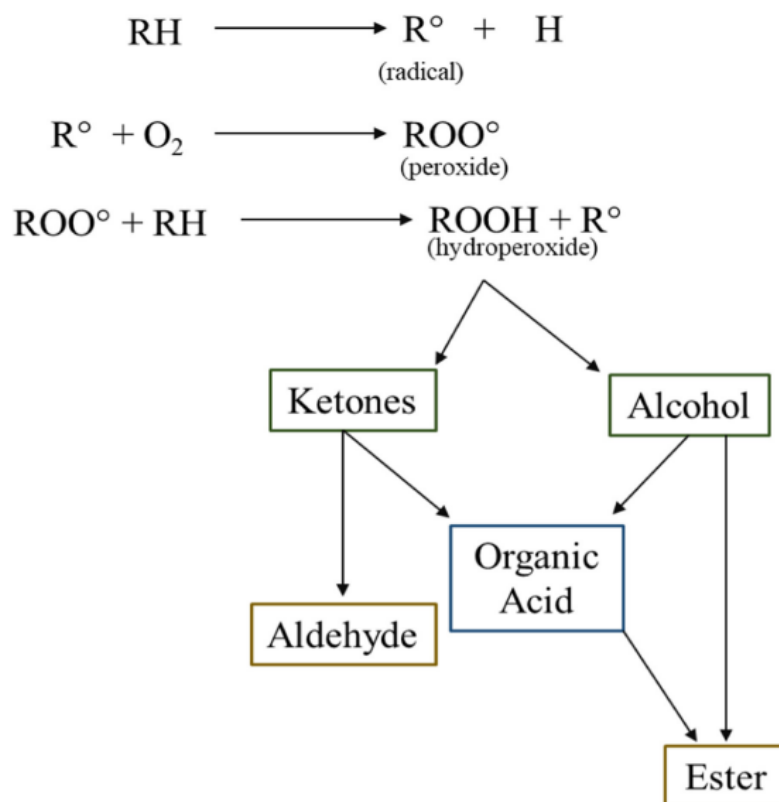
ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงาน ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีความเค้นหลากหลายรูปแบบเกิดขึ้นตลอดเวลา เช่น ความเค้นทางความร้อน (thermal stress) ความเค้นทางไฟฟ้า (electrical stress) ความเค้นทางกล (mechanical stress) และความเค้นทางเคมี (chemical stress) ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ไปเร่งการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า [34] แต่สำหรับการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ามีสาเหตุหลักมาจากความเค้นทางความร้อนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพต่างๆ ได้แก่

### 2.4.1 กลไกการเสื่อมสภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ความเค้นทางความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ของน้ำมันฉนวน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้น้ำมันที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเสื่อมสภาพ ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดที่อุณหภูมิในช่วง 120 - 130 องศาเซลเซียส และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 8 - 9 องศาเซลเซียส [35] โดยมีออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ โดยออกซิเจนจะมาจากองค์ประกอบของน้ำมันหรือจากสิ่งแวดล้อมภายนอก นอกจากนี้ยังมีโลหะบางชนิดภายในหม้อแปลง เช่น ทองแดง ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำให้เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีชนิดต่างๆ การเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 2 กรณีตามชนิดของน้ำมันหม้อแปลง ได้แก่

#### 2.4.1.1 น้ำมันแร่

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเริ่มต้นจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันแร่เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (free radicals) แล้วทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นโมเลกุลเปอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นๆ แล้วเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) และอนุมูลอิสระที่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อ ซึ่งไฮโดรเปอร์ออกไซด์เหล่านี้ไม่เสถียรจึงเกิดการสลายตัวกลายเป็นคีโตน (ketone) น้ำ (water) และแอลกอฮอล์ (alcohol) อย่างไรก็ตามคีโตนยังสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไปได้ และเกิดเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และแอลดีไฮด์ (aldehyde) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งผลิตภัณฑ์ต่างๆ เหล่านี้ที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำมันเกิดสภาพการนำไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติความเป็นฉนวนไดอิเล็กทริก [36]

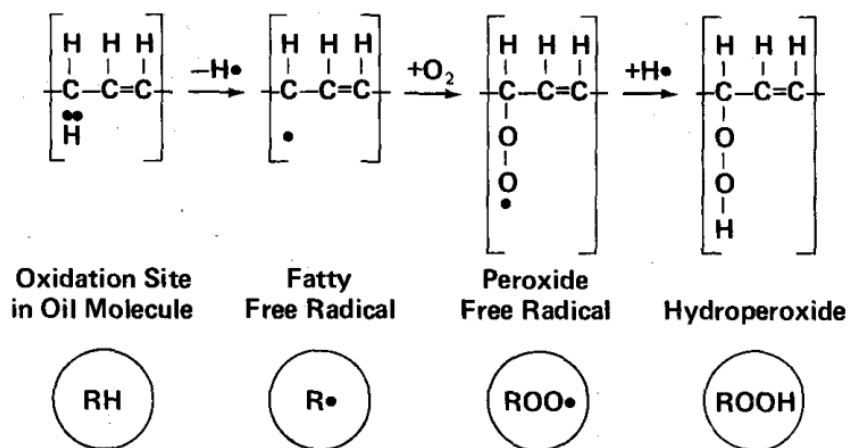


รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันแร่ [11]

#### 2.4.1.2 น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติเช่นกัน และมีรูปแบบการเกิดแบบปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ของอนุมูลอิสระเช่นเดียวกับปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดในน้ำมันแร่ โดยการเกิดปฏิกิริยานี้ในเอสเทอร์ธรรมชาติเริ่มต้นจากการเกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งเกิดจากการหลุดออกของอะตอมไฮโดรเจนของหมู่เมทิลีน (methylene group) ที่อยู่ถัดมาจากตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวดังแสดงในรูปที่ 2.8 เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนตรงตำแหน่งแอลฟาและอะตอมไฮโดรเจนตรงหมู่เมทิลีนมีความไม่เสถียรและอ่อนแอต่อออกซิเจน [37, 38] จากนั้นอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ แล้วอนุมูลเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ของน้ำมัน โดยมีการกำจัดอะตอมไฮโดรเจนออกมาเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระตัวอื่นๆ ที่จะเกิดการขยายตัวในปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไป ขณะที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดการสลายตัวหรือแตกตัว

เป็นอนุมูลอิสระจำนวนมากแล้วเข้าสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป ซึ่งในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระจะมีโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาเกี่ยวข้อง เช่น ทองแดง และเหล็ก จนในที่สุดเกิดผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นคีโตน แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ และกรดไขมัน [39]

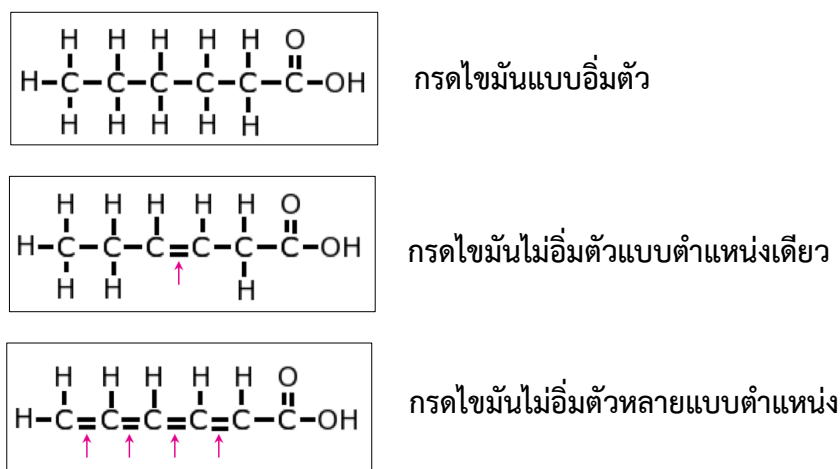


รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอสเทอร์ธรรมชาติ [39]

#### 2.4.2 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน (oxidation polymerization reaction) เกิดขึ้นกับน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ ซึ่งเกี่ยวข้องกับสมบัติของกรดไขมันที่อยู่ในโครงสร้างของน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ ในส่วนของปริมาณความแตกต่างกันขององค์ประกอบความไม่อิ่มตัว ความไม่อิ่มแบบตำแหน่งเดี่ยว แบบตำแหน่งคู่ (double unsaturated) และแบบหลายตำแหน่ง [40] ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยถ้าน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติมีปริมาณความไม่อิ่มตัวมาก ซึ่งหมายถึงมีจำนวนพันธะคู่ที่อยู่ในโครงสร้างของกรดไขมันมีมากทำให้น้ำมันมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยานี้ได้เร็วมากยิ่งขึ้น และถ้าน้ำมันมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีปริมาณความไม่อิ่มตัวแบบหลายตำแหน่งมาก ก็จะทำให้น้ำมันมีความไม่เสถียรต่อภาวะอากาศอย่างมาก และเกิดการออกซิไดส์ได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ในทางกลับกันถ้าเอสเทอร์ธรรมชาติมีกรดไขมันที่มีปริมาณความไม่อิ่มตัวแบบตำแหน่งเดี่ยวมาก น้ำมันจะเกิดการออกซิไดส์กับอากาศที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น [41]

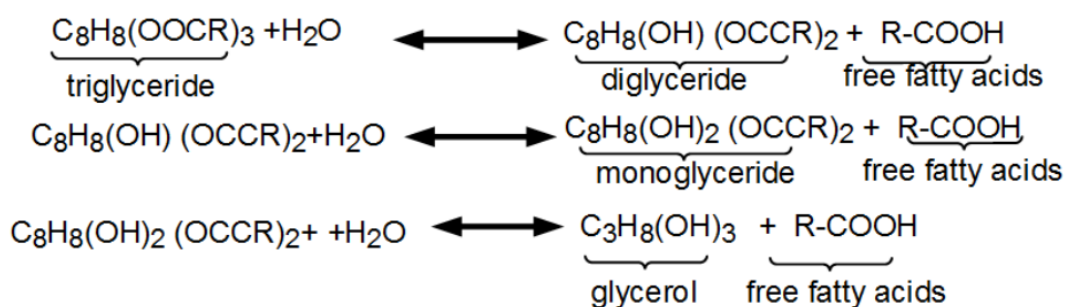




รูปที่ 2.9 ชนิดกรดไขมันที่มีความอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวแตกต่างกัน

### 2.4.3 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

นอกจากปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้ว ยังมีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ที่ทำให้น้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพ โดยปฏิกิริยานี้จะมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องและเป็นปฏิกิริยาเชิงเร่งที่เกิดขึ้นได้เอง (autocatalytic reaction) เนื่องจากโมเลกุลของกรดไขมันที่อยู่ในโครงสร้างของน้ำมันเอสเตอร์ธรรมชาติจะทำหน้าที่ในเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากการเกิดไดกลีเซอไรด์ (diglyceride) ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไตรกลีเซอไรด์และน้ำ จากนั้นไดกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นมอนอกลิเซอไรด์ (monoglyceride) และในขั้นตอนสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอล (glycerol) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างมอนอกลิเซอไรด์กับน้ำ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (reversible) และได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมัน [42] ดังแสดงในรูปที่ 2.10

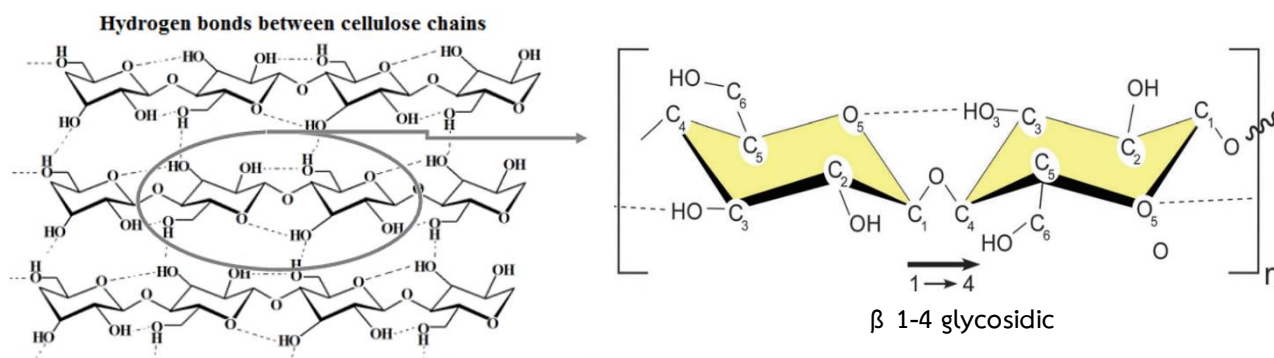


รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอสเตอร์ธรรมชาติ [35]

## 2.5 กระดาษฉนวนเซลลูโลส

วัสดุของแข็งที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลง คือ กระดาษ เนื่องจากมีราคาไม่สูงมาก และสามารถผลิตได้จากธรรมชาติ อีกทั้งยังมีสมบัติการเป็นฉนวนได้อิเล็กทริกและสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อใช้งานร่วมกับน้ำมันฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ปกติแล้วกระดาษฉนวนจะถูกนำไปใส่ในบริเวณขดลวดตัวนำ เนื่องจากมีความต้านทานต่อแรงดึงที่ดีจึงทำให้สามารถห่อหุ้มรอบวงของขดลวดตัวนำได้ และเพื่อหลีกเลี่ยงการไหลของกระแสไฟฟ้า แต่กระดาษฉนวนมีข้อจำกัดเช่นกัน ได้แก่ มีสมบัติการดูดความชื้นได้ง่าย ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน และมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นถ้ากระดาษฉนวนเสื่อมสภาพแล้วจะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้นลง

กระดาษฉนวนมีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส ซึ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) ที่มีโมเลกุลของวงแหวนกลูโคสต่อกันเป็นสายโซ่ตรง [43] โดยมีสูตรทางเคมีเป็น  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เมื่อ  $n$  คือ หน่วยที่ซ้ำกัน (repeating units) ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) 2 วงที่เชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนด้วยพันธะโคเวเลนต์ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของวงแหวนกลูโคสวงที่ 1 และคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของวงแหวนที่อยู่ติดกัน โดยตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกันนั้นเรียกว่าพันธะเบต้า 1-4 ไกลโคซิดิก ( $\beta$  1-4 glycosidic bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งในแต่ละหน่วยที่ซ้ำกันจะมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลระหว่างวงแหวนกลูโคสที่อยู่ติดกัน จึงทำให้เกิดความเป็นสายโซ่ตรงในเซลลูโลส นอกจากนี้ยังสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลถัดไปทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันจนก่อตัวเกิดเป็นเส้นใย (fiber) ภายในกระดาษฉนวน สายโซ่เซลลูโลสจะจัดเรียงตัวทั้งแบบเป็นผลึก (crystalline) ซึ่งมีความเป็นระเบียบ และแบบอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งไม่มีความเป็นระเบียบ ทำให้มีการจัดเรียงตัวไม่หนาแน่นและว่องไวต่อการเกิดการเสื่อมสภาพ โดยทั่วไปความแข็งแรงของกระดาษฉนวนสามารถประเมินได้จากค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ซึ่งจะขึ้นกับจำนวนเฉลี่ยของกลูโคสต่อโมเลกุลเซลลูโลสหรือหมายถึงค่าที่เรียกว่า ระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization: DP) ซึ่งทั้งค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อกระดาษฉนวนนั้นเกิดการเสื่อมสภาพ[44]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของของเซลลูโลส [43]

ในปัจจุบันกระดาษฉนวนที่นิยมนำมาใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้า คือ กระดาษคราฟท์ (kraft paper) ดังแสดงในรูปที่ 2.12ก ซึ่งทำมาจากเยื่อไม้เนื้ออ่อน (softwood pulp) ที่ไม่ฟอกสี แล้วมาผ่านกระบวนการที่เรียกว่า ซัลเฟต (sulphate) หรือคราฟท์ (kraft process) [45] ซึ่งกระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ประกอบด้วยเซลลูโลส 78-80% เฮมิเซลลูโลส 10-20% และลิกนิน 2-6% [45] แต่กระดาษฉนวนชนิดนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของความต้านทานต่อความร้อน ซึ่งสามารถรองรับความร้อนได้เพียง 105 องศาเซลเซียสเท่านั้น จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง เนื่องจากต้องเปลี่ยนกระดาษฉนวนอยู่บ่อยครั้งซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงและเสียเวลา นอกจากนี้ยังมีกระดาษฉนวนอีกประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาใช้กับหม้อแปลงเช่นกัน คือ กระดาษไดมอนด์ดอท (diamond dot) ดังแสดงในรูปที่ 2.12ข ซึ่งจะถูกนำมาใช้ตรงบริเวณที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกลสูง โดยกระดาษฉนวนชนิดนี้ทำขึ้นโดยการเคลือบกระดาษคราฟท์ด้วยเรซินชนิดเทอร์โมเซตติง (thermosetting resin) ซึ่งส่วนใหญ่รูปร่างของเรซินที่ก่อตัวขึ้นจะมีลักษณะเป็นจุดจนกลายเป็นรูปสี่เหลี่ยม แล้วมีการจัดเรียงในรูปแบบของข้าวหลามตัดอาจจะทั้งสองด้านหรือเพียงด้านใดด้านหนึ่งบนพื้นผิวของกระดาษ หลังจากนั้นนำไปต้มให้ความร้อนจนกระทั่งเรซินละลายเคลือบเป็นชั้นบางๆ บนพื้นผิวกระดาษ และก่อให้เกิดพันธะที่สามารถทนทานต่อตัวทำละลายของน้ำมันหม้อแปลงเวลานำกระดาษลงไปจุ่มแช่ [45]



(ก)



(ข)

**รูปที่ 2.12** ชนิดของกระดาษฉนวนที่นิยมนำมาใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้า: (ก) กระดาษคราฟท์ และ (ข) กระดาษไดมอนด์ดอท

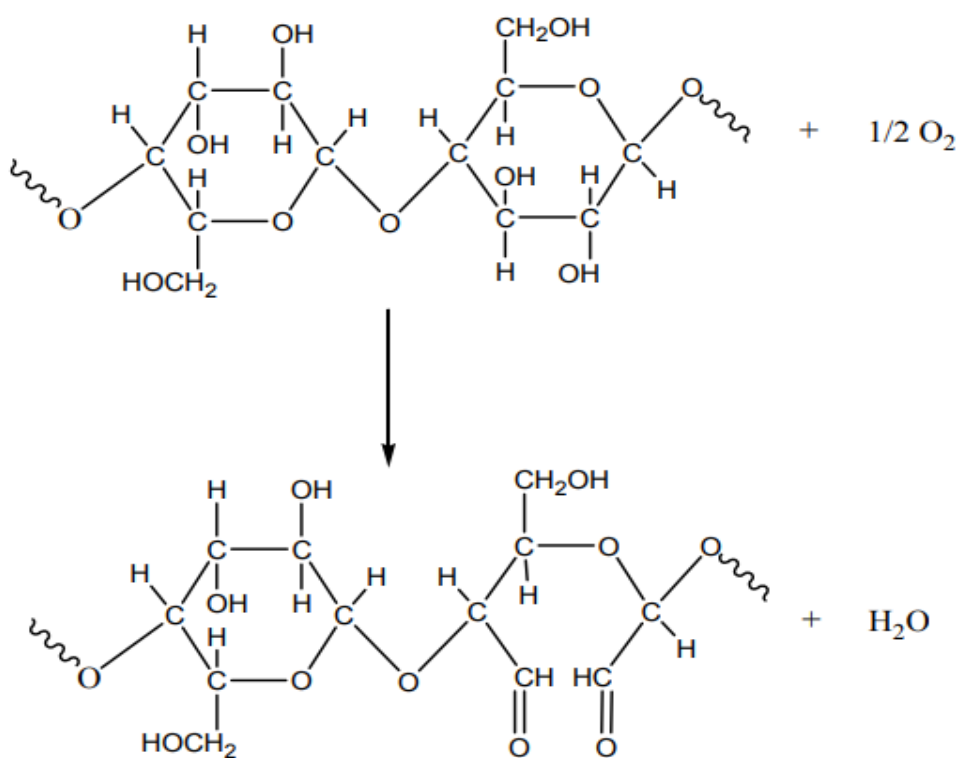
## 2.6 กลไกการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

การเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนเกิดจากการแตกตัวของพันธะโควาเลนต์และพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ภายในและระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เซลลูโลสที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าทำงาน กระดาษฉนวนที่ถูกจุ่มแช่ลงในน้ำมันหม้อแปลง จะต้องได้รับความร้อนสูง เกิดการสัมผัสกับความชื้น ออกซิเจน และผลิตภัณฑ์กรดต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนหรือกระดาษฉนวนเอง [46] ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อกระดาษฉนวนทำให้เกิดการสูญเสียสมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพความเป็นฉนวนลดลง ดังนั้นการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนเกี่ยวมีหลายปัจจัยมาเกี่ยวข้อง จึงทำให้เกิดกลไกการเสื่อมสภาพทางปฏิกิริยาเคมีที่แตกต่างกันออกไปกัน ดังนี้

### 2.6.1 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระดาษฉนวนจะเกิดที่อุณหภูมิในช่วง 65-70 องศาเซลเซียส [47] โดยทั่วไปเซลลูโลสมีความไวต่อการเกิดออกซิเดชันอย่างมาก ซึ่งในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยมีโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะก่อให้เกิดกลุ่มของคาร์บอนิลและคาร์บอกซิล เช่น คีโตน แอลดีไฮด์ และกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะทำให้พันธะไกลโคซิดิกของกลูโคสอ่อนตัวลงจนนำไปสู่การตัดขาดของสายโซ่ที่สั้นลงจนได้น้ำ

ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ทั้งยังมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) เกิดขึ้นด้วย โดยผลิตภัณฑ์กรดและน้ำที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นจุดเริ่มต้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาศนวนต่อไป อย่างไรก็ตาม หลังจากผ่านไประยะเวลาหนึ่งทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นพร้อมกัน [48]

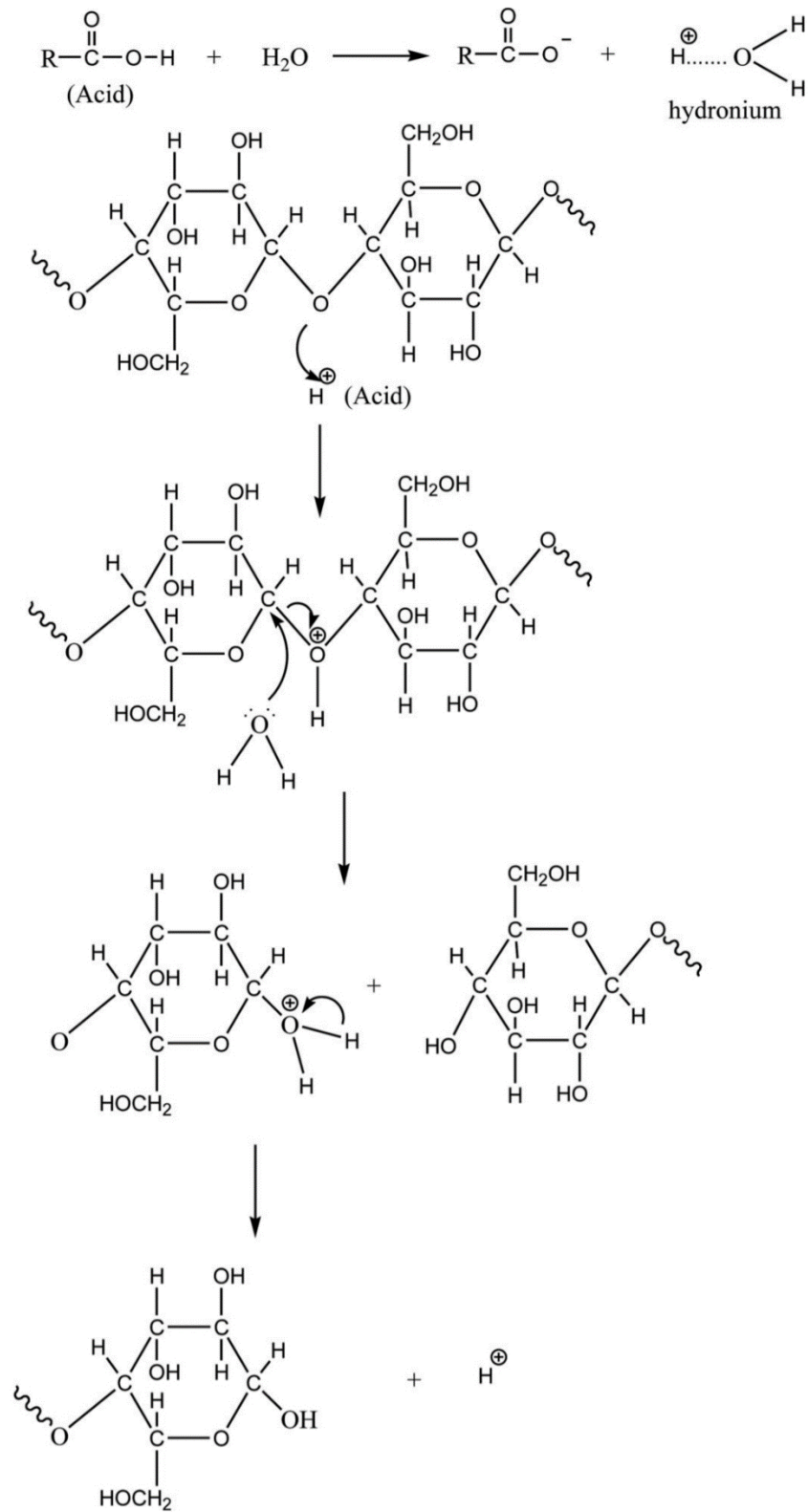


รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระดาศนวนเซลลูโลส [48]

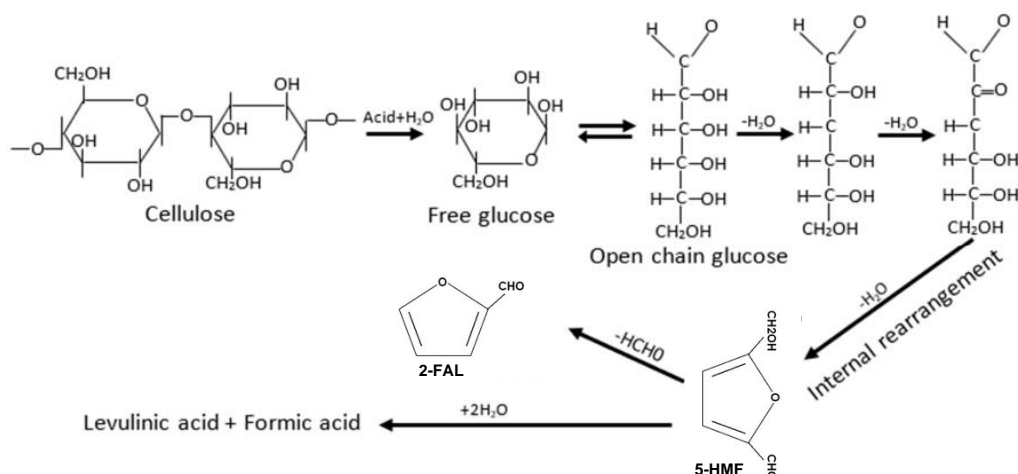
## 2.6.2 กลไกการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาศนวนเกี่ยวข้องกับการแตกตัวของพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งถูกเร่งปฏิกิริยาจากน้ำและกรดที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของทั้งน้ำมันและกระดาศนวน [49] โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดที่อุณหภูมิในช่วง 70-130 องศาเซลเซียส [47] ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาศนวนเริ่มจากกรดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระดาศนวนมีการแตกตัวในน้ำเกิดเป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) หลังจากจากนั้นไฮโดรเจนไอออนรวมตัวกับน้ำได้เป็น

ไฮโดรเนียมไอออน และเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนตรงพันธะไกลโคซิดิกของกระดาศนวนวน ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจึงทำให้กระดาศนวนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงสี และหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ วงกลูโคสอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายต่อไปด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสได้ออกมาเป็นสารประกอบฟูแรนและน้ำ [50] โดยสารประกอบฟูแรน 2 ชนิดหลักที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ ได้แก่ 2-เฟอร์รัลดีไฮด์ (2-furfuraldehyde: 2-FAL) และ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (5-hydroxy-methyl-furfural: 5-HMF) ซึ่ง 5-HMF ไม่เสถียรในภาวะกรด จึงเกิดการสลายตัวผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เป็นกรดฟอร์มิก (formic acid) และกรดลิวูลินิก (levulinic acid) [51] ดังแสดงในรูปในที่ 2.15 อีกทั้งยังมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้อีกด้วย โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาศนวนวนจะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของกรด ซึ่งกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะกระตุ้นการเกิดไฮโดรไลซิสของกระดาศนวนวนได้มากกว่ากรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น กรดสแตียริก และกรดแนฟทานิก เนื่องจากหมู่แอลคิลของกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาดขนวนเซลลูโลส [50]

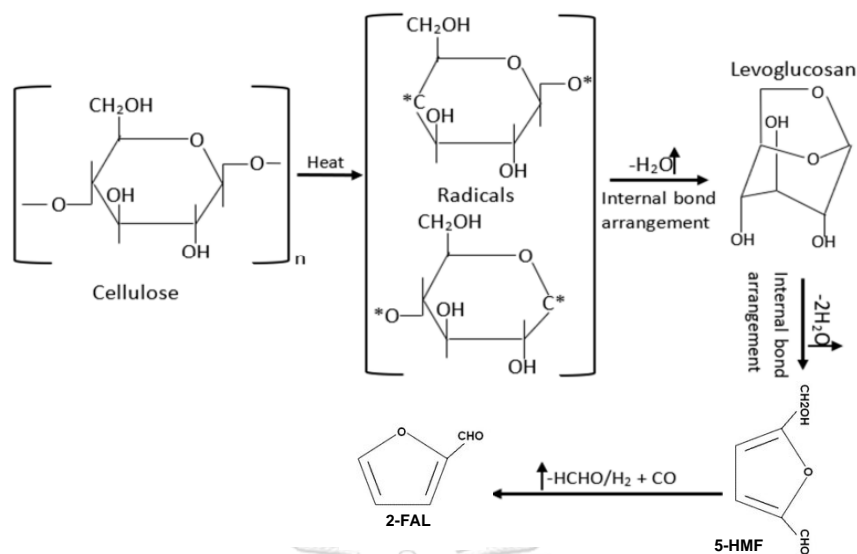


รูปที่ 2.15 การเกิดสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FAL และกรดอินทรีย์ต่างๆ ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาษฉนวน [52]

### 2.6.3 กลไกการเสื่อมสภาพจากไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของวัสดุจากความร้อนในที่อับอากาศและความชื้น ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 130 องศาเซลเซียสขึ้นไป [47] โดยความร้อนจะทำให้พันธะไกลโคซิกที่เชื่อมกันในสายโซ่เซลลูโลสเกิดการตัดขาดออกจนเกิดวงกลูโคสอิสระออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ และก่อตัวเป็นเลวโกลูโคซาน (levoglucosan) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวกลางในการเกิดสารประกอบฟูแรนและกรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดลิวลินิก กรดแอสติก และกรดไพรูวิก (pyruvic acid) [52] นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังเกิดการเปิดวงแหวนกลูโคสที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลลูโลส ซึ่งได้ความชื้นและแก๊สชนิดต่างๆ ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน อีกทั้งยังส่งผลทำให้ระดับการเกิดพอลิเมอร์เซชันของกระดาษฉนวนมีค่าลดลง [53]





รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของกระดาษฉนวนเซลลูโลส [52]

## 2.7 การวิเคราะห์ทดสอบการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลง

การวิเคราะห์ทดสอบการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 3 สมบัติหลักดังนี้

### 1. สมบัติทางกายภาพ (physical property)

1.1. สีและลักษณะที่ปรากฏ (color and appearance) เป็นสิ่งแรกที่ใช้ในการบ่งบอกระดับการเสื่อมสภาพและการปนเปื้อนของน้ำมันฉนวน โดยสีและลักษณะที่ปรากฏของน้ำมันฉนวนใหม่จะมีสีใสและมีความโปร่งแสงอย่างมาก แต่หากน้ำมันฉนวนนั้นผ่านการใช้งานมาแล้วจะมีสีเข้มขึ้น [54]

1.2. ความหนืด (viscosity) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการต้านทานการไหล ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการระบายความร้อน ซึ่งความหนืดของน้ำมันฉนวนมีผลต่อความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อน (conduction) สำหรับน้ำมันฉนวนที่นำมาใช้งานด้านหม้อแปลงไฟฟ้าควรมีความหนืดต่ำ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ดี [54]

1.3. แรงตึงผิว (interfacial tension) เป็นสมบัติของน้ำมันฉนวนที่แสดงถึงการปนเปื้อนของสารละลายมีขั้วและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเป็นการวัดแรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลของชั้นน้ำมันและน้ำมันฉนวน โดยทั่วไปน้ำมันฉนวนใหม่จะมีค่าแรงตึงผิวสูง แต่หลังผ่านการใช้งานค่าแรงตึงผิวจะมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้น

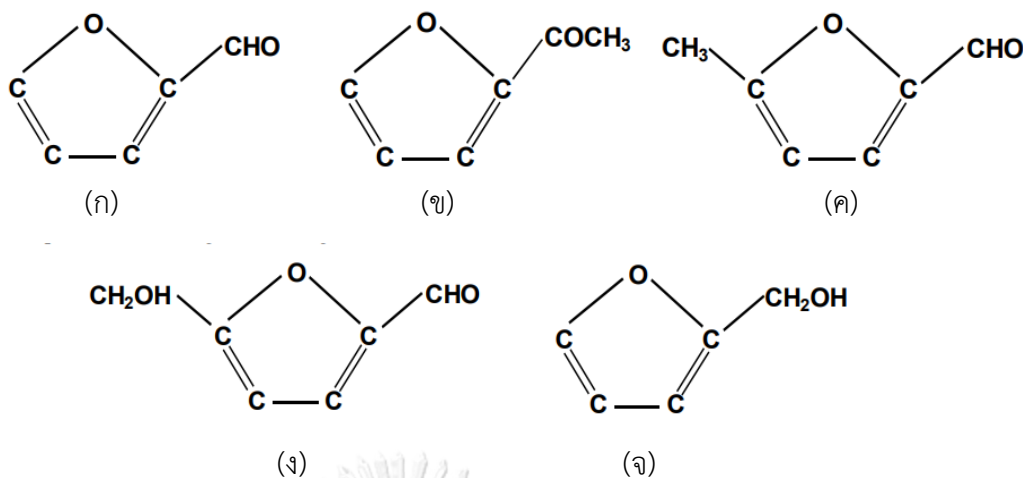
ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและกระดาษฉนวนหรือสารปนเปื้อนมี  
ขี้ลละลายอยู่มากขึ้น [55]

## 2. สมบัติทางเคมี (chemical property)

2.1. ปริมาณความชื้น (water content) ซึ่งการมีอยู่ของน้ำในระบบฉนวนเป็นอันตราย  
อย่างมากต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแม้จะมีเพียงเล็กน้อย เนื่องจากน้ำจะไปเร่งการเสื่อมสภาพ  
ของน้ำมันและกระดาษฉนวน นอกจากนี้จะส่งผลทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามีค่า  
ลดลง น้ำมันจะสูญเสียความเป็นฉนวน แต่จะนำไฟฟ้าได้แทน [54]

2.2. ความเป็นกรด (acidity) เป็นการวัดปริมาณองค์ประกอบของกรดที่มีอยู่ในน้ำมันฉนวน  
โดยปกติน้ำมันฉนวนใหม่จะมีปริมาณของกรดน้อยมาก แต่หลังจากการใช้งานค่าความ  
เป็นกรดจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมัน  
ฉนวน [54]

2.3. ปริมาณสารประกอบฟูแรน (furan content) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ  
ของกระดาษฉนวนที่ละลายอยู่ในน้ำมันฉนวน โดยสารประกอบฟูแรนที่เกิดขึ้นนั้นจะ  
ประกอบด้วย 2-FAL, 5-HMF, 2-แอสติลฟูแรน (2-acetylfuran: 2-ACF),  
5-เมทิล-2-เฟอรัลดีไฮด์ (5-methyl-2-furfuraldehyde: 5-M2F) และ  
2-เฟอร์ฟูริล-แอลกอฮอล์ (2-furfuryl-alcohol: 2-FOL) โดยมีโครงสร้างดังแสดงใน  
รูปที่ 2.17 ซึ่งต้องไม่มีสารเหล่านี้ในน้ำมันฉนวนใหม่ [56]



**รูปที่ 2.17** โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบฟูแรนแต่ละชนิด (ก) 2-เฟอร์รัลดีไฮด์ (ข) 2-แอเซติลฟูแรน (ค) 5-เมทิล-2-เฟอร์รัลดีไฮด์ (ง) 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์รัลดีไฮด์ และ (จ) 2-เฟอร์ฟิวริล-แอลกอฮอล์ [57]

2.4. ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายอยู่ในน้ำมันฉนวน (dissolved decay content) เป็นการวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันฉนวนที่เกิดการเสื่อมสภาพ โดยสารประกอบเหล่านี้เป็นสารประกอบในกลุ่มจำพวกเปอร์ออกไซด์ แอลดีไฮด์ คีโตน และกรดอินทรีย์ โดยสารเหล่านี้บางส่วนจะถูกขับบนพื้นผิวของกระดาษฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมสภาพก่อนกำหนด [58]

### 3. สมบัติทางไฟฟ้า (electrical property)

- 3.1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric breakdown voltage) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการเป็นตัวฉนวนตัวกลางที่ดี และบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของน้ำมันฉนวน โดยเป็นการวัดค่าความสามารถของน้ำมันฉนวนในการคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับโดยไม่เกิดความเสียหาย [54] ซึ่งค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เมื่อมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ในน้ำมันฉนวน เช่น เศษเส้นใยของฉนวนแข็งอนุภาคนำไฟฟ้า (conductive particles) ความชื้น หรือความสกปรกต่างๆ
- 3.2. แฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric dissipation factor) ใช้ในการบ่งบอกคุณภาพของน้ำมันฉนวน โดยเป็นการวัดปริมาณความสูญเสียทางฉนวนของน้ำมันฉนวนเมื่อสัมผัสกับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ [54] โดยปกติแฟกเตอร์กำลังสูญเสีย

ไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของสิ่งเจือปนหรืออนุพันธ์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ เช่น ความชื้น อนุภาคตัวนำไฟฟ้า และอนุพันธ์จากการเกิดออกซิเดชัน

- 3.3. สภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เป็นค่าที่จะใช้บ่งบอกชนิดของฉนวนของเหลวไฟฟ้า ซึ่งเกี่ยวข้องกับความจุของฉนวนในการถ่ายโอนภายใต้สนามไฟฟ้า [54] โดยสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลง เมื่อมีสิ่งปนเปื้อนมีขั้วเจือปนอยู่ เช่น ความชื้นหรืออนุภาคต่างๆ
- 3.4. สภาพความต้านทานทางไฟฟ้า (resistivity) บ่งบอกถึงการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) แก่น้ำมันฉนวน โดยปกติการใช้งานด้านหม้อแปลงไฟฟ้าต้องการให้น้ำมันฉนวนมีค่านี้มาก [59] เนื่องจากสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าจะเป็นค่าที่ตรงข้ามกับการนำไฟฟ้า (conductivity) เมื่อน้ำมันฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพจะมีสภาพกรด เกิดความชื้น และอนุภาคตัวนำไฟฟ้าขึ้นส่งผลทำให้สภาพความต้านทานของน้ำมันมีค่าลดลง แต่การนำไฟฟ้าของน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น

## 2.8 การวิเคราะห์ทดสอบการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนเซลลูโลส

การวิเคราะห์ทดสอบการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงแบ่งออกเป็น 2 สมบัติหลักดังนี้

1. ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) เป็นค่าที่สามารถตรวจสอบภาวะการใช้งานของกระดาษฉนวน โดยอาศัยความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ทำให้กระดาษฉนวนเกิดการฉีกขาดเสียหาย เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มแรงเชิงความร้อนมากขึ้น ส่งผลทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนจะลดลงจนกระทั่งลดลงคงเหลือ 50% จากค่าความต้านทานแรงดึงเริ่มต้น ซึ่งถือว่าเป็นอายุสิ้นสุด (end of life) ของกระดาษฉนวนตาม IEEE loading guide กำหนด [60]
2. ระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) เป็นค่าที่บ่งบอกการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวน ซึ่งค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นตัวแทนจำนวนหน่วยกลูโคสเฉลี่ยต่อโมเลกุลเซลลูโลส โดยปกติฉนวนฉนวนใหม่มีค่า 1,200 แต่เมื่อกระดาษฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพจะมีค่าลดลงจนถึง 200 ซึ่งถือว่าเป็นอายุสิ้นสุดของกระดาษฉนวนตาม IEEE loading guide กำหนด [61]

## 2.9 มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ในการบ่มเร่งด้วยความร้อนของน้ำมันหม้อแปลงจะมี 2 มาตรฐานที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทดลอง ได้แก่

2.8.1 มาตรฐาน IEEE Std.C57.100-2011 (IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power Transformer) [60] ซึ่งกำหนดขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

- ชนิดของโลหะ, ชนิดของน้ำมัน, ชนิดของกระดาษฉนวน และปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบ ควรเป็นอัตราส่วนจริงของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งาน
- กระดาษฉนวนก่อนทำการทดสอบ จะต้องทำการอบ เพื่อปรับให้ปริมาณความชื้นภายในกระดาษฉนวนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25% ถึง 0.5% ของน้ำหนักฉนวนกระดาษแห้ง ตามการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าจริง
- ในการประเมินผลการทดสอบการบ่มเร่งเชิงความร้อนของน้ำมันและกระดาษฉนวน ในทางอุตสาหกรรมจะต้องมีปิดผนึกด้วยแก๊สไนโตรเจน เพื่อไล่อากาศออกและป้องกันไม่ให้อากาศและความชื้นเข้ามาสู่ภายใน
- อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบต้องอย่างน้อย 3 อุณหภูมิ ในช่วงไม่เกิน 20 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาข้อมูลมาพิจารณาในการสร้างกราฟ เพื่อหาอายุขัยของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.8.2 มาตรฐานมาตรฐาน IEEE Std.C57.91-2011 (IEEE Guide for Loading Mineral oil-immersed transformers and step-voltage regulators) [61] บ่งบอกถึงอายุขัยของหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความต้านทานแรงดึงและระดับการเกิดพอลิเมอร์เซชันของกระดาษฉนวน โดยกำหนดอายุสิ้นสุด (end-of-life) ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าคงความต้านทานแรงดึง (retained tensile strength) เท่ากับ 50% และ 25% ตามลำดับ และค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์เซชันเท่ากับ 200 จากค่าเริ่มต้นของกระดาษฉนวน

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ariffin และคณะ [62] เปรียบเทียบผลการเสื่อมสภาพด้วยการบ่มเร่งทางความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ และน้ำมันแร่ที่มีกระดาษฉนวนชนิดกราฟท์จุ่มแช่ โดยน้ำมันพืชที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันข้าวโพด (corn oil) และน้ำมันรำข้าว (rice bran oil) ด้วยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วัน, 90 วัน และ 180 วัน ภายใต้ระบบปิด

พบว่าภายหลังจากการบ่มเร่งค่าความคงทนต่อตันไฟฟ้า (dielectric breakdown voltage) ของน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิดยังคงมีค่าสูงกว่าน้ำมันแร่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 70-95 กิโลโวลต์ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ของน้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นจากการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวน โดยน้ำมันพืชมีค่าอยู่ในช่วง 1.8-2.0 ขณะที่น้ำมันแร่มีค่า 1.38-1.50 ในส่วนของค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) น้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่น้ำมันแร่ยังคงมีค่าน้อยสุดเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชอีก 3 ชนิด แต่ในทางกลับกันค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า (resistivity) ของน้ำมันทุกชนิดจะมีค่อยๆ ลดลง เมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งมากขึ้น เนื่องจากการมีความชื้นและกรดที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามน้ำมันแร่ยังคงมีค่ามากที่สุด ขณะที่ความหนืดน้ำมันทุกชนิดมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการบ่มเร่ง ในส่วนของปริมาณความชื้นของน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงจาก 1,200-1,500 ppm เหลือ 500-600 ppm หลังจากผ่านการบ่มเร่ง 180 วัน ซึ่งแตกต่างจากน้ำมันแร่ที่ยังคงมีปริมาณความชื้นค่อนข้างต่ำ ขณะที่ค่ากรดของน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิดเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น เทียบกับน้ำมันแร่ที่ยังคงมีค่ากรดน้อยกว่า นอกจากนี้ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันทุกชนิดมีค่าลดลง โดยกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันรำข้าวมีค่าลดลงมากที่สุดที่ 25.49% เนื่องจากความชื้นในน้ำมันรำข้าวยังคงมีปริมาณมาก ซึ่งจะไปเร่งการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาษฉนวนจึงทำให้กระดาษฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพอย่างมาก แม้ว่าความชื้นเหล่านั้นจะถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสภายในน้ำมันรำข้าวเกิดเป็นกรดไขมันอิสระแล้วก็ตาม รองลงมา คือ น้ำมันปาล์มลดลง 24.67% และน้ำมันแร่ลดลง 20.66% ขณะที่น้ำมันจากข้าวโพดมีค่าลดลงน้อยสุดที่ 16.16%

Subburaj และคณะ [63] ศึกษาลักษณะที่สำคัญภายหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนของน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะกอก (olive oil) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองนี้ดำเนินการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 วัน พบว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มยังมีค่าสูงสุดที่ 54 กิโลโวลต์ (kV) เมื่อเทียบกับน้ำมันแร่และน้ำมันมะกอกที่มีค่า 40 กิโลโวลต์ และ 32 กิโลโวลต์ ตามลำดับ เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวมากจึงส่งผลทำให้มีความหนืดมาก ซึ่งอนุภาคต่างๆ ที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านบ่มเร่งจึงเคลื่อนที่ได้ช้า ดังนั้นค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มยังคงมีค่าสูง นอกจากนี้น้ำมันปาล์มยังมีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าและค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกดีกว่าน้ำมันอีก 2 ชนิด โดยน้ำมันปาล์มมีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า  $10.5 \times 10^{12}$  โอห์มเมตร ( $\Omega m$ ) ขณะที่น้ำมันมะกอกและน้ำมันแร่มีค่า  $9.8 \times 10^{12}$  โอห์มเมตร และ  $9 \times 10^{12}$  โอห์มเมตร ตามลำดับ ในส่วนของค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันปาล์มมีค่า 0.359 น้ำมันมะกอกมีค่า 0.817 และน้ำมันแร่มีค่า 1.04 ในทางกลับกันปริมาณความชื้นและปริมาณความเป็นกรดของทั้งน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะกอกมีค่าสูงกว่าน้ำมันแร่อย่างมาก เนื่องจากโดย

ธรรมชาติน้ำมันพืชมีสมบัติการดูดความชื้นได้ดี (hydropscopic) และมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งกรดเหล่านี้ไม่ส่งผลเสียต่อกระดาษฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า แต่อาจต้องพิจารณาในส่วนของความหนืดของน้ำมันมะกอกและน้ำมันปาล์มที่มีค่าสูงถึง 55 เซนติสโตก และ 58 เซนติสโตก ซึ่งอาจมีผลต่อความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนของน้ำมัน

Bandara และคณะ [64] ศึกษาประสิทธิภาพของเอสเทอร์ธรรมชาติจากทานตะวันที่มีกระดาษฉนวนชนิดชนิดอัดแข็งความหนาแน่นสูง (high density pressboard, HPB) เพื่อนำไปใช้เป็นน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า อีกทั้งยังเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ โดยทำการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 28, 35, 48, 62, 73 และ 84 วัน ภายใต้บรรยากาศที่อิมมัวด้วยความชื้น พบว่าภายหลังจากการบ่มเร่งเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันทั้ง 2 ชนิดจากสีอ่อนเป็นสีเข้มขึ้น โดยปกติสีเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนถึงระดับการเสื่อมสภาพและอาจมีการปนเปื้อนในน้ำมันระหว่างการบ่มเร่ง ในกรณีน้ำมันแร่ที่เกิดเสื่อมสภาพจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและถ้าเกิดการเสื่อมสภาพมากจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ เนื่องจากมีปริมาณกรดมากจนก่อตัวเป็นกากตะกอนภายในน้ำมันทำให้มีความหนืดมากขึ้นจนส่งผลกระทบต่อการระบายความร้อนที่ไม่ดี แต่ในขณะที่เอสเทอร์ธรรมชาติมีปริมาณกรดมากกว่าและการเปลี่ยนแปลงสีเข้มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่กรดเหล่านี้มาจากการเสื่อมสภาพด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยไม่อันตรายต่อกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ซึ่งสอดคล้องกับผลการลดลงของค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซีในกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในเอสเทอร์ธรรมชาติน้อยกว่าจุ่มแช่ในน้ำมันแร่ อีกทั้งสารประกอบฟูลแรนชนิด 2-FAL ซึ่งบ่งบอกการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนในเอสเทอร์ธรรมชาติมีปริมาณน้อยกว่าที่พบในน้ำมันแร่ ดังนั้นการเสื่อมสภาพของเอสเทอร์ธรรมชาติไม่สามารถตัดสินได้เพียงแค่นี้และปริมาณกรดที่เกิดขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของเอสเทอร์ธรรมชาติหลังจากผ่านการบ่มเร่งเพิ่มขึ้นถึง 21% และสูงกว่าเกือบ 5 เท่าเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดการเสื่อมสภาพจากกระดาษฉนวนเป็นพวกอนุภาคตัวนำไฟฟ้าและมีความเข้มข้นจึงสามารถละลายได้ดีในเอสเทอร์ธรรมชาติที่มีความเข้มข้นเหมือนกัน จึงทำให้เอสเทอร์ธรรมชาติมีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียที่สูงกว่า

Tokunaga และคณะ [65] ประเมินอายุการใช้งานของกระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ผ่านการอัปเดตด้วยความร้อน (thermally upgraded kraft paper, TUP) และกระดาษฉนวนชนิดอัดแข็งความหนาแน่นสูงที่จุ่มแช่ในเอสเทอร์ของกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid ester) และน้ำมันแร่ที่อุณหภูมิ 150, 160, และ 170 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ถึง 2,880 ชั่วโมง ในระบบปิดพบว่ากระดาษชนิดคราฟท์และกระดาษชนิดอัดแข็งที่จุ่มแช่ในเอสเทอร์ของกรดไขมันปาล์มมีอัตราการเสื่อมสภาพที่ช้ากว่าในน้ำมันแร่ เนื่องจากน้ำมันแร่มีปริมาณน้ำสูงขึ้นจนถึง 60 ppm ทำให้กระดาษฉนวนเกิดความเสียหายอย่างมาก และส่งผลต่อการคงความต้านทานแรงดึงมีค่าน้อยกว่า 20%, ระดับการเกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซีน้อยกว่า 200 และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลดลง

เหลือ 24 กิโลวัตต์เมื่อเทียบกับเอสเทอร์ของกรดไขมันปาล์ม นอกจากนี้กรดที่เกิดขึ้นจำนวนมากในระหว่างการบ่มเร่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่เร่งการเสื่อมสภาพของกรดไขมันที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่ และเมื่อประเมินอายุการใช้งานของกรดไขมันตามมาตรฐาน JEM 1463 ซึ่งกำหนดระดับการเกิดพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 450 และค่าการความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 50% เป็นเกณฑ์อายุสิ้นสุดของกรดไขมัน พบว่ากรดไขมันทั้งหมด 2 ชนิดจุ่มแช่ในเอสเทอร์ของกรดไขมันปาล์มต้องใช้ระยะเวลาบ่มเร่งนานกว่าในน้ำมันแร่ทั้ง 3 อุณหภูมิจึงจะเข้าใกล้มีค่าใกล้เคียงที่อายุสิ้นสุดที่กำหนด

Abdelmalik และคณะ [66] ศึกษาการเสื่อมสภาพทางความร้อนของกรดไขมันด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติที่พัฒนามาจากอัลคิลเอสเทอร์ของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil alkyl ester: PKOAE) ที่มีความหนืดต่ำและมีความเสถียรต่อออกซิเจนและความร้อนที่ดี เทียบกับน้ำมันแร่ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นระยะเวลา 28 วัน, 56 วัน และ 84 วัน พบว่าอัตราการเสื่อมสภาพของกรดไขมันที่จุ่มแช่ในน้ำมันปาล์มชนิด PKOAE ช้ากว่าในน้ำมันแร่ โดยสังเกตได้จากค่าความสามารถในการคงความต้านทานแรงดึงของกรดไขมันที่ลดลงช้ากว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรดไขมันที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่ เนื่องจากความสามารถของเอสเทอร์ธรรมชาติในการดูดซับน้ำที่ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จึงเป็นสาเหตุทำให้น้ำที่อยู่ในกรดไขมันเกิดการเคลื่อนย้ายไปยังน้ำมันได้ในปริมาณมากกว่า นอกจากนี้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันปาล์มภายหลังการบ่มเร่งยังคงมีค่าสูงกว่าในน้ำมันแร่ แต่เมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้อย่างไม่ชัดเจน ดังนั้นน้ำมันปาล์มชนิด PKOAE จึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับใช้เป็นฉนวนสำหรับในหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อช่วยยืดอายุของกรดไขมันในหม้อแปลงไฟฟ้า และทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าใช้งานได้ยาวนานขึ้น

Ridzuan และคณะ [58] เปรียบเทียบพฤติกรรมจากบ่มเร่งด้วยความร้อนระหว่างน้ำมันปาล์ม น้ำมันเรพซีด (rapeseed oil) และน้ำมันแร่ ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 100, 250, 500, 1,000 และ 1,500 ชั่วโมง พบว่าภายหลังจากบ่มเร่งน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ (decay product content) เช่น เปอร์ออกไซด์ แอลดีไฮด์ คีโตน และกรดอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามน้ำมันปาล์มยังคงแสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่าน้ำมันเรพซีด เนื่องจากหลังจากผ่านการบ่มเร่งที่ระยะเวลา 1,500 ชั่วโมง ในน้ำมันเรพซีดมีปริมาณกรดจำนวนมากจนก่อให้เกิดกากตะกอน (sludge) ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของความร้อนของน้ำมันที่ไม่ดีและสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันลดลง แม้ว่าน้ำมันปาล์มจะมีปริมาณความชื้นและปริมาณสารประกอบที่เกิดจากการเสื่อมสภาพมากกว่า

Dewi และคณะ [67] ศึกษาผลกระทบจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนในด้านสมบัติทางเคมีไฟฟ้า และกายภาพของเอสเทอร์ธรรมชาติจากน้ำมันปาล์ม โดยทดลองที่อุณหภูมิ 85 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 336, 672 และ 1,008 ชั่วโมง ภายใต้ระบบปิด ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิจะมี



กระดาศนวนที่อบและไม่อบก่อนจุ่มแช่ลงในน้ำมัน พบว่าภายหลังจากการบ่มเร่งทั้งอุณหภูมิ 85 และ 120 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะเวลา 336 ชั่วโมง แต่หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากน้ำถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยกระดาศนวนที่ผ่านการอบก่อนการจุ่มแช่จะมีปริมาณความชื้นน้อยกว่ากระดาศนวนที่ไม่ผ่านการอบทั้ง 2 อุณหภูมิการบ่มเร่งในส่วนปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมัน เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นแก๊สที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของกระดาศนวนและมีปริมาณมากที่สุดในช่วงการบ่มเร่ง โดยตัวอย่างที่มีกระดาศนวนไม่ผ่านการอบก่อนการจุ่มแช่ที่ผ่านบ่มเร่งทั้ง 2 อุณหภูมิและตัวอย่างที่ผ่านการบ่มเร่งอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสทั้งที่มีกระดาศนวนที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบก่อนการจุ่มแช่จะมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นสูงกว่า ขณะที่สภาพความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากในระหว่างการบ่มเร่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งก่อให้เกิดตัวนำไฟฟ้าและอนุภาคต่างๆ เช่น ไอออนที่ไม่เสถียรที่สามารถรวมตัวกับไอออนตัวอื่นๆ เกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ละลายในน้ำมันจนวนซึ่งส่งผลทำให้ความหนืดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าแรงดึงผิวมีค่าลดลง นอกจากนี้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงเช่นเดียวกันจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการบ่มเร่ง

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวในข้างต้น พบว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไป น้ำมันและกระดาศนวนจะเกิดการเสื่อมสภาพซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ ในด้านสมบัติทางกายภาพ เคมีและไฟฟ้าของน้ำมันจนวน พร้อมทั้งสมบัติที่เกี่ยวข้องกับกระดาศนวนก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

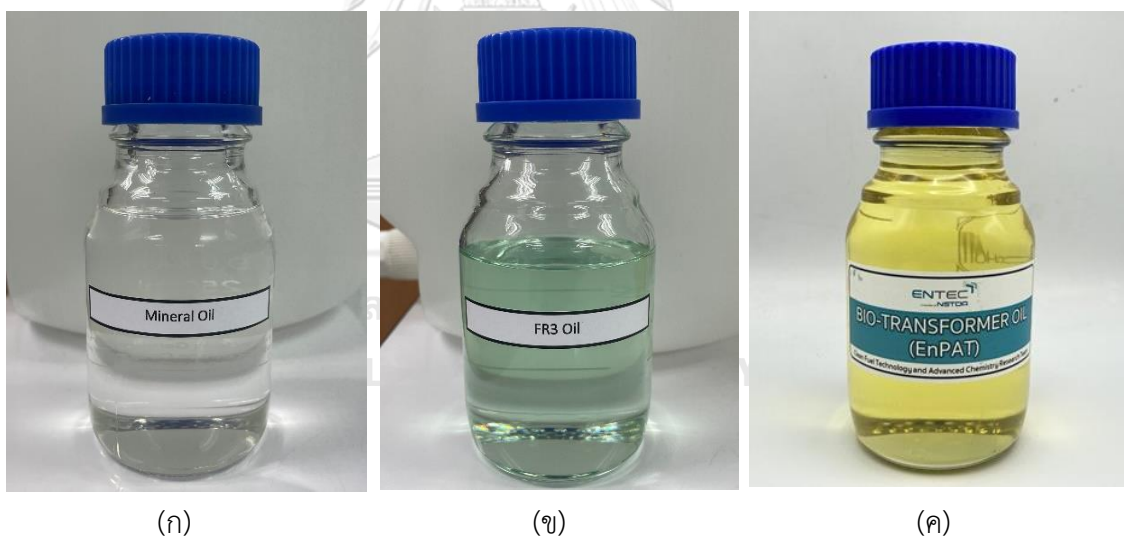
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันแร่ เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ในด้านสมบัติทางกายภาพ เคมี และไฟฟ้า ด้วยการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาการบ่มเร่งที่แตกต่างกัน ภายใต้ระบบปิดที่มีบรรจุแก๊สไนโตรเจนและแก๊สอาร์ซีโรว์ รวมถึงศึกษาการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิดภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. น้ำมันแร่ (MO) ดังรูปที่ 3.1ก
2. เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) ดังรูปที่ 3.1ข
3. น้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ดังรูปที่ 3.1ค



รูปที่ 3.1 น้ำมันหม้อแปลงชนิดต่างๆ (ก) น้ำมันแร่ (ข) เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และ (ค) น้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT)

4. แถบทองแดง (copper strip) ความหนา 0.1 มม. มีขนาดความกว้าง 3.2 ซม. และความยาว 30 ซม.
5. แถบเหล็กซิลิคอน (silicon steel strip) ความหนา 0.027 มม. มีขนาดความกว้าง 5 ซม. และความยาว 30 ซม.

6. กระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ ความหนา 0.13 มม. มีขนาดความกว้าง 2.5 ซม. และความยาว 30 ซม. ดังรูปที่ 3.2ก
7. กระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ ความหนา 0.18 มม. มีขนาดความกว้าง 2.5 ซม. และความยาว 30 ซม. ดังรูปที่ 3.2ข
8. กระดาษฉนวนชนิดไทมอนด์ท ความหนา 0.18 มม. มีขนาดความกว้าง 2.5 ซม. และความยาว 30 ซม. ดังรูปที่ 3.2ค
9. กระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ ความหนา 0.5 มม. มีขนาดความกว้าง 2.5 ซม. และความยาว 30 ซม. ดังรูปที่ 3.2ง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

**รูปที่ 3.2** กระดาษฉนวนเซลลูโลสชนิดต่างๆ (ก) กระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ ความหนา 0.13 มม. (ข) กระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ ความหนา 0.18 มม. (ค) กระดาษฉนวนชนิดไทมอนด์ท ความหนา 0.18 มม. และ (ง) กระดาษฉนวนชนิดคราฟท์ ความหนา 0.5 มม.

10. นอร์มัลเฮกเซน (n-hexane) (AR grade, AnaPURE)
11. นอร์มัลเฮปเทน (n-heptane) (AR grade, QReC)
12. ไพรีดีน (pyridine) (Sigma-Aldrich)
13. เอ็น,โอ-บิส(ไตรเมทิลซิลิล)ไตรฟลูออโรแอซีทาไมด์ (BSTFA) (Sigma-Aldrich)
14. แก๊สไนโตรเจน (nitrogen gas) ความบริสุทธิ์ 99.999%
15. แก๊สแอร์ซีโร่ (air zero gas) โดยองค์ประกอบของแก๊สออกซิเจน 21% และแก๊สไนโตรเจน 79%

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. ท่อหลอดแก้ว (glass vessel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 ซม. และความสูง 37 ซม.
2. ท่อสแตนเลสพร้อมฝาปิด (stainless steel vessel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ซม. และความยาว 38 ซม.
3. ปะเก็นยาง (rubber gasket) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม.
4. ตู้อบลมร้อน (hot air oven): ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF110
5. ตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven): ยี่ห้อ Memert รุ่น VO200
6. เครื่องทำความร้อน (heater)
7. เครื่องชั่งดิจิตอล (digital balance): ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ME204T
8. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump): ยี่ห้อ Atlas Copco รุ่น GVD 1.5
9. โถแก้วดูดความชื้น (desiccator)
10. กล่องถุงมือสุญญากาศ (glovebox)
11. Automatic colorimeter: ยี่ห้อ Lovibond รุ่น PFX195
12. Karl Fischer Coulometer with generator electrode with diaphragm: ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 831
13. Titrando autotitrator: ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 809
14. Automated kinematic viscometer: ยี่ห้อ Cannon รุ่น miniAV
15. UV Visible Near Infrared Spectrometer: ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV3600plus
16. Gas chromatography-flame ionization detection (GC-FID): ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010

17. Oil tan delta test set: ยี่ห้อ Megger รุ่น OTD
18. Fully automatic insulating oil dielectric breakdown testing: ยี่ห้อ Megger รุ่น OTS100AF
19. Interfacial tension tester
20. High Performance Liquid Chromatography (HPLC)
21. Universal testing machine: ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AGX-V

### 3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

3.3.1 กระบวนการปรับสภาพ (pretreatment) ของน้ำมันหม้อแปลงทั้ง 3 ชนิด มีขั้นตอนดังนี้

1. นำน้ำมันแร่, เอสเตอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันชีวภาพจากปาล์ม (EnPAT) มาวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในน้ำมันเริ่มต้นด้วยวิธี Karl Fischer titration
2. นำน้ำมันแต่ละชนิดจำนวน 2 ลิตร บรรจุลงท้อหลอดแก้วแล้วบรรจุลงในท้อสแตนเลสวางปะเก็นยางปิดฝา แล้วหมุนเกลียวสายรัดให้แน่น
3. นำท้อสแตนเลสที่บรรจุน้ำมันเรียบร้อยแล้วมาบรรจุลงในเครื่องทำความร้อนพร้อมเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศดังรูปที่ 3.3 โดยกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง
4. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด ทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในน้ำมันแต่ละชนิด



รูปที่ 3.3 รูปแบบกระบวนการปรับสภาพของน้ำมันหม้อแปลง

3.3.2 กระบวนการปรับสภาพของแถบเหล็กซิลิคอนและแถบทองแดง มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักแถบเหล็กซิลิคอนและแถบทองแดงด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล

2. จากนั้นนำแถบเหล็กซิลิคอนและแถบทองแดงเข้าตู้อบสุญญากาศโดยกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 105 องศาเซลเซียส ความดัน 20 มิลลิบาร์ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
3. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด นำแถบเหล็กซิลิคอนและแถบทองแดงออกจากตู้อบสุญญากาศแล้วชั่งน้ำหนัก
4. หลังจากนั้นเก็บแถบเหล็กซิลิคอนและแถบทองแดงในโถแก้วดูความชื้น

### 3.3.3 กระบวนการปรับสภาพของกระดาษฉนวนเซลลูโลส มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักกระดาษฉนวนเซลลูโลสแต่ละความหนาด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล
2. จากนั้นนำกระดาษฉนวนเซลลูโลสเข้าตู้อบสุญญากาศโดยกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 105 องศาเซลเซียส ความดัน 20 มิลลิบาร์ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง
3. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด นำกระดาษฉนวนเซลลูโลสออกจากตู้อบสุญญากาศแล้วชั่งน้ำหนัก
4. หลังจากนั้นเก็บกระดาษฉนวนเซลลูโลสในโถแก้วดูความชื้น

### 3.3.4 กระบวนการปรับสภาพของของผสม (น้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิด, แถบเหล็กซิลิคอน, แถบทองแดง และกระดาษฉนวนเซลลูโลส) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแถบเหล็กซิลิคอน, แถบทองแดง และกระดาษฉนวนเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วตามข้อ 3.3.2 - 3.3.3 บรรจุลงในท่อหลอดแก้วที่บรรจุน้ำมันผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วตามข้อ 3.3.1 โดยมีอัตราส่วนดังต่อไปนี้ดังรูปที่ 3.4
  - อัตราส่วนโดยปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง : ปริมาตรกระดาษฉนวนเซลลูโลส คือ  $200 \text{ cm}^3 : 11.2 \text{ cm}^3$
  - อัตราส่วนโดยปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง : พื้นที่ผิวของแถบเหล็กซิลิคอน : พื้นที่ผิวของแถบทองแดง คือ  $200 \text{ cm}^3 : 582.5 \text{ cm}^2 : 164.3 \text{ cm}^2$
2. หลังจากนั้นนำท่อหลอดแก้วมาบรรจุลงในท่อสแตนเลส วางปะเก็นยาง ปิดฝาแล้วหมุนเกลียวสายรัดให้แน่น
3. จากนั้นนำท่อสแตนเลสมาบรรจุลงในเครื่องทำความร้อนพร้อมเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศโดยกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
4. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด นำออกมาพักไว้ในกล่องถุงมือสุญญากาศ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ปิดฝา



**รูปที่ 3.4** การจุ่มแช่ของกระดาศนวนเซลลูโลส, แกลบเหล็กซิลิโคน และแกลบทองแดงลงในน้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิด

### 3.5.5 กระบวนการบ่มเร่งเชิงความร้อน มีขั้นตอนดังนี้

1. นำทอสแดนเลสแบบปิดที่บรรจุของผสมที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพมาแล้วมาบรรจุแก๊สไนโตรเจนความดัน 5 บรรยากาศ หรือแก๊สอากาศความดัน 5 บรรยากาศ เพื่อตรวจสอบการรั่วไหลของแก๊ส ก่อนปรับลดความดันของลงเหลือ 1 บรรยากาศ
2. หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720, 1,440, 2,016, 2,880, 4,008, 5,016 และ 6,000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีรายละเอียดการทดลองดังตารางที่ 3.1
3. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างที่ได้ออกมาพักไว้ในกล่องถุงมือสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปวิเคราะห์ทดสอบ





รูปที่ 3.5 การบรรจุท่อสแตนเลสแบบปิดภายในตู้อบลมร้อน

### ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแรงด้วยความร้อน

อุณหภูมิการบ่มแรง (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่ใช้บ่มแรง (ชั่วโมง)
110	2,880, 5,016 และ 6,000
130	720, 2,016, 2,880, 4,008 และ 5,016
150	720*, 1,440, 2,016, 2,880 และ 4,008

\* มีการบรรจุแก๊สอากาศเทียบกับแก๊สไนโตรเจน

### 3.4 การวิเคราะห์ทดสอบ

3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่อง Automatic colorimeter: ยี่ห้อ Lovibond รุ่น PFX195 ตามมาตรฐาน ASTM D1500 [68] โดยค่าสีที่อ่านได้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 8.0 และปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 10 มิลลิลิตร
2. การวิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่อง Automated kinematic viscometer: ยี่ห้อ Cannon รุ่น miniAV ตามมาตรฐาน ASTM D445 [69] โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบที่ 40 องศาเซลเซียส และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 5 มิลลิลิตร ซึ่งมีหน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt)



3. การวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวด้วยเครื่อง interfacial tension tester ตามมาตรฐาน D971 [70] โดยใช้วิธีการทดสอบ Ring method และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ในทดสอบ 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลินิวตันต่อเมตร (mN/m)

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยเครื่อง Karl Fischer Coulometer with generator electrode with diaphragm: ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 831 ตามมาตรฐาน ASTM D1533 [71] โดยใช้วิธีการ Karl Fischer method และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 1 มิลลิลิตร ซึ่งมีหน่วยเป็นส่วนในล้านส่วน (ppm)
2. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด้วยเครื่อง Titrandot autotitrator: ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 809 ตามมาตรฐาน ASTM D974 [72] โดยวัดจากปริมาณของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างจนถึงจุดยุติ และน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 6 กรัม ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง (mgKOH/g)
3. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันหม้อแปลงด้วยเครื่อง UV Visible Near Infrared Spectrometer: ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV3600plus ตามมาตรฐาน ASTM D6802 [73] โดยมีความยาวคลื่นแสงช่วง 360-600 นาโนเมตร (nm) และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 10 มิลลิลิตร
4. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบพวเรนด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ตามมาตรฐาน ASTM D5837 [74] ซึ่งมีหน่วยเป็นส่วนในพันล้านส่วน (ppb)
5. การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันในด้วยเครื่อง Gas chromatography-flame ionization detection (GC-FID): ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- Column : Elite5HT

- Column dimension : 12 m x 0.32 mm i.d., 0.10  $\mu$ m

- Injector temperature : 300 °C
- Detector temperature : 360 °C
- Injection mode : split ratio = 25
- Oven temperature
  - initial temp : 80 °C hold 2 min
  - Ramp to 340 °C (rate 8 °C/min), hold 10 min
- Helium carrier gas flow : 10 ml/min
- Hydrogen detector gas flow : 40 ml/min
- Air zero detector gas flow : 400 ml/min
- Injection volume : 1 µl

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยเครื่อง Fully automatic insulating oil dielectric breakdown testing: ยี่ห้อ Megger รุ่น OTS100AF ตามมาตรฐาน IEC 60156 [75] โดยใช้อิเล็กโทรดรูปทรงเห็ด (mushroom electrode) ที่มีระยะห่างกัน 2.5 มิลลิเมตร พร้อมกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage) ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน 2.0 กิโลโวลต์ต่อวินาที และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 150 มิลลิลิตร ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลโวลต์
2. การวิเคราะห์ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง Oil tan delta test set: ยี่ห้อ Megger รุ่น OTD ตามมาตรฐาน IEC 60247 [76] โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบที่ 90 องศาเซลเซียส ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2.0 กิโลโวลต์ ที่มีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ (Hz) และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 100 มิลลิลิตร
3. การวิเคราะห์ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ด้วยเครื่อง Oil tan delta test set: ยี่ห้อ Megger รุ่น OTD ตามมาตรฐาน IEC 60247 [76] โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบที่ 90 องศาเซลเซียส ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 2.0 กิโลโวลต์ ที่มีความถี่ 55 เฮิร์ตซ์ และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 100 มิลลิลิตร

4. การวิเคราะห์ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Oil tan delta test set: ยี่ห้อ Megger รุ่น OTD ตามมาตรฐาน IEC 60247 [76] โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบที่ 90 องศาเซลเซียส ด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage) 500 โวลต์ และปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 100 มิลลิลิตร ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์มเมตร ( $\Omega\text{m}$ )

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติของกระดาษฉนวนเซลลูโลสก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์สมบัติความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine: ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AGX-V ตามมาตรฐาน ASTM D828 [77] โดยมีรายละเอียดดังนี้
  - ขนาดตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ คือ มีความกว้าง  $25.4 \pm 0.5$  มิลลิเมตร และความยาว 254 มิลลิเมตร
  - ระยะห่างของตัวจับชิ้นงานทดสอบ (grip separation) มีค่าเท่ากับ 180 มิลลิเมตร
  - อัตราการดึงของตัวจับชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร/นาที
  - การคำนวณหาความทนต่อแรงดึง (TS) โดยใช้แรงดึงสูงสุดต่อหน่วยความกว้างที่กระดาษฉนวนสามารถต้านทานได้ก่อนที่จะขาด ภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด ในหน่วยกิโลนิวตัน/เมตร (kN/m) โดยมีสูตรการคำนวณ

ดังแสดงในสมการที่ 3.1 UNIVERSITY

$$TS = \frac{\text{maximum force (kN)}}{\text{specimen width (m)}} \quad (3.1)$$

2. การวิเคราะห์ค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์เซชันตามมาตรฐาน ASTM D4243 [78] โดยนำกระดาษฉนวนเซลลูโลสที่ผ่านการจุ่มแช่ในน้ำมันมาล้างด้วยเฮกเซน (hexane) หลังจากนั้นนำกระดาษฉนวนมาตัดให้เป็นชิ้นเล็ก และชั่งน้ำหนักของกระดาษฉนวนที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐานกำหนด แล้วนำกระดาษฉนวนเหล่านั้นมาละลายในสารละลายปิเอสเอที สีนไดเอมีน คอปเปอร์ (II) ไฮดรอกไซด์

[Bis(ethylenediamine)copper(II)hydroxide)] จนเข้ากันได้ จากนั้นนำสารละลายของผสมที่ได้ไปวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด แล้วนำค่าความหนืดที่ได้ไปคำนวณหาค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$\overline{DP}_v^\alpha = [\eta]/K \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\overline{DP}_v$  คือ ค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย

$[\eta]$  คือ ค่าความหนืดในตัว (intrinsic viscosity) หน่วย มิลลิลิตร/กรัม (mL/g)

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะของมอนอเมอร์มีค่าเท่ากับ 1

$K$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลักษณะของระบบที่มีพอลิเมอร์ (กระดาษฉนวน) และตัวทำละลาย (สารละลายบิสเอทิลีนไดเอมีนคอปเปอร์(II)ไฮดรอกไซด์) มีค่าเท่ากับ  $7.5 \times 10^{-3}$  [78]

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหม้อแปลง

##### 4.1.1 การเปลี่ยนแปลงสี













##### 4.1.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.3 จะเห็นได้ว่าหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันแต่ละชนิด โดยน้ำมันแร่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีใสเป็นสีเหลือง ส่วน FR3 จะเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวใสเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลือง ขณะที่ EnPAT เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองเข้ม นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำมันทั้ง 3 ชนิด เกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเร่งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน จะเป็นการไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันและกระดาษฉนวน ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์กรดและสารประกอบที่เกิดการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันฉนวน ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันฉนวน [79, 80] ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวัดค่าสีด้วยเครื่อง colorimeter ที่เกิดขึ้น โดยเป็นการวัดค่าการดูดกลืนของแสงของน้ำมันตัวอย่างเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D1500 กำหนดไว้ ค่าสี < 0.5 เป็นสีเหลืองอ่อน (pale yellow) ไปจนถึงค่าสี 8.0 เป็นสีน้ำตาลเข้ม (dark brown) ที่แสดงถึงน้ำมันเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง ซึ่งจากตารางที่ 4.1-4.3 จะเห็นได้ว่าค่าสีของน้ำมันทุกชนิดที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้งที่ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ มีค่าสีเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่ถึงค่าสีเท่ากับ 8 ตามที่มาตรฐาน ASTM D1500 กำหนด เนื่องจากการทดลองนี้ดำเนินการภายใต้ระบบปิด แก๊สออกซิเจนจึงมีปริมาณน้อย อีกทั้งยังมีการบรรจุแก๊สไนโตรเจนไว้ภายใน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเกิดแบบไม่รุนแรง ทำให้ค่าสีของน้ำมันทั้ง 3 ชนิดจึงมีค่าสีไม่เกินตามที่มาตรฐานกำหนด โดยค่าสีเริ่มต้นของน้ำมันแร่มีค่า < 0.5 แต่หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส น้ำมันแร่มีค่าสีเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 0.7-1.4 ส่วน FR3 มีค่าสีเริ่มต้น < 0.5 หลังจากผ่านบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3



















อุณหภูมิ ค่าสีเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 0.5-1.0 ขณะที่ EnPAT มีค่าสีเริ่มต้น 1.0 หลังจากผ่านการ  
บ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิเช่นเดียวกัน มีค่าสีเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 1.1-1.3



**ตารางที่ 4.1** การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันแต่ละชนิดที่ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน


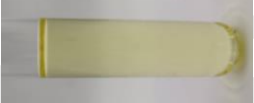
















ชนิดของน้ำมัน	การเปลี่ยนแปลงสี			
	ก่อนการบ่มเร่ง	นาน 2,880 ชม.	นาน 5,016 ชม.	นาน 6,000 ชม.
น้ำมันแฉะ	 ค่าสี <math>< 0.5</math>	 ค่าสี 0.8	 ค่าสี 0.7	 ค่าสี 0.7
FR3	 ค่าสี <math>< 0.5</math>	 ค่าสี 0.8	 ค่าสี 0.8	 ค่าสี 0.8
EnPAT	 ค่าสี 1.0	 ค่าสี 1.2	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1

**ตารางที่ 4.2** การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันแต่ละชนิดที่ก่อกวนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ชนิดของน้ำมัน	การเปลี่ยนแปลงสี					
	ก่อนการบ่มเร่ง	นาน 720 ชม.	นาน 2,016 ชม.	นาน 2,880 ชม.	นาน 4,008 ชม.	นาน 5,016 ชม.
น้ำมันแร่	 ค่าสี < 0.5	 ค่าสี 0.8	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1	 ค่าสี 0.9	 ค่าสี 1
FR3	 ค่าสี < 0.5	 ค่าสี 0.5	 ค่าสี 0.7	 ค่าสี 0.7	 ค่าสี 0.8	 ค่าสี 0.8
EnPAT	 ค่าสี 1.0	 ค่าสี 1.2	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1








**ตารางที่ 4.1** การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันแต่ละชนิดที่ก่อนและหลังการปรมแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ชนิดของน้ำมัน	การเปลี่ยนแปลงสี					
	ก่อนการปรมแรง	นาน 720 ชม.	นาน 1,440 ชม.	นาน 2,016 ชม.	นาน 2,880 ชม.	นาน 4,008 ชม.
น้ำมันแร่	 ค่าสี < 0.5	 ค่าสี 0.9	 ค่าสี 1.0	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.4
FR3	 ค่าสี < 0.5	 ค่าสี 0.8	 ค่าสี 0.7	 ค่าสี 0.6	 ค่าสี 0.7	 ค่าสี 1.0
EnPAT	 ค่าสี 1.0	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 1.3

#### 4.1.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันฉนวนแต่ละชนิดหลังจากผ่านบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 30 วัน (720 ชม.) ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าน้ำมันทั้ง 3 ชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและค่าสีอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง โดยน้ำมันแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีใสเป็นสีน้ำตาล และมีค่าสีเพิ่มขึ้นจาก  $< 0.5$  เป็น 4.0 ส่วน FR3 เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวใสเป็นสีเหลือง และมีค่าสีเพิ่มขึ้นจาก  $< 0.5$  เป็น 1.7 ขณะที่ EnPAT เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล และมีค่าสีเพิ่มขึ้นจาก 1.0 เป็น 2.4 นอกจากนี้เมื่อนำน้ำมันเหล่านี้เทียบกับน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาเท่ากัน ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าน้ำมันทุกชนิดที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนจะมีสีของน้ำมันเข้มกว่า และมีค่าสีมากกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งบอกได้ว่าน้ำมันเกิดการเสื่อมสภาพที่รุนแรงมากกว่า เนื่องจากแก๊สออกซิเจนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นการบรรจุแก๊สออกซิเจนเข้าไปในระบบยิ่งเป็นการไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [81] ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพจำนวนมาก ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันอย่างเด่นชัด อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าสีของ FR3 และ EnPAT หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีค่าน้อยกว่าค่าสีของน้ำมันแรก เนื่องจากความสามารถของสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชันที่ถูกเติมลงใน FR3 และ EnPAT ขณะที่น้ำมันแรกที่นำมาใช้ทดสอบเป็นชนิดเนฟทานิกที่มีโครงสร้างแบบไซโคลแอลเคน (Cycloalkane) ซึ่งเกิดออกซิเดชันได้ง่าย ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าสีของน้ำมันแรกเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

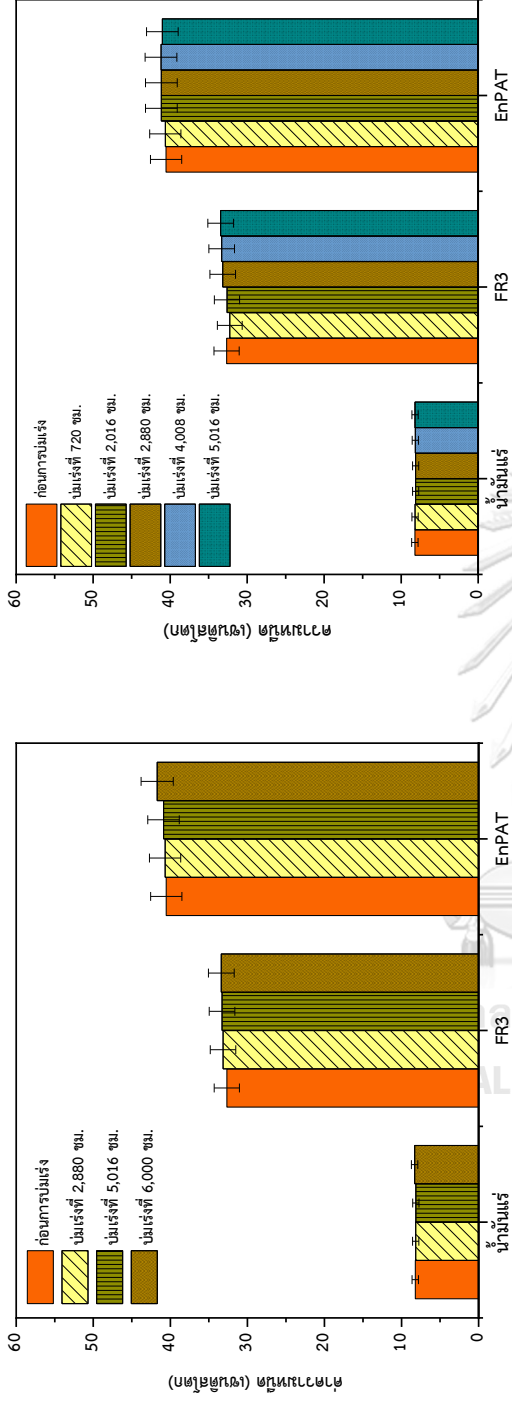
**ตารางที่ 4.2** การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำมันแต่ละชนิดที่ต่างก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบกับบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	การเปลี่ยนแปลงสี		
	ก่อนการบ่มแรง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแร่	 ค่าสี < 0.5	 ค่าสี 0.9	 ค่าสี 4.0
FR3	 ค่าสี < 0.5	 ค่าสี 0.8	 ค่าสี 1.7
EnPAT	 ค่าสี 1.0	 ค่าสี 1.1	 ค่าสี 2.4

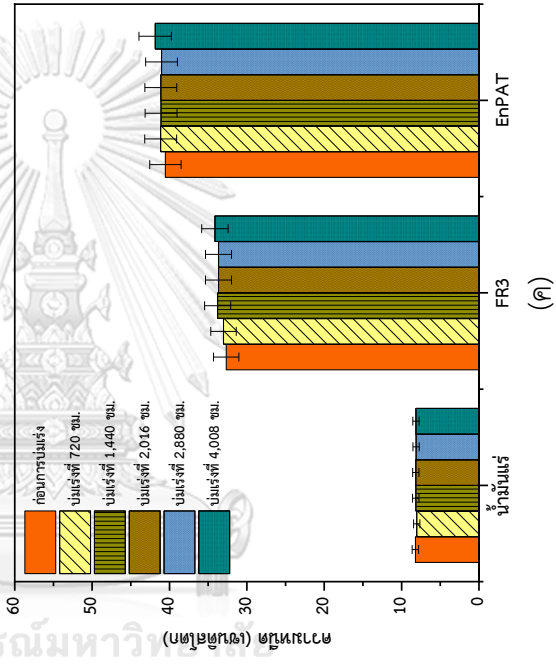
#### 4.1.2 ความหนืด

##### 4.1.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลทดลองการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าค่าความหนืดของน้ำมันทุกชนิดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการบ่มเร่ง เนื่องจากการทดลองนี้ดำเนินการภายใต้ระบบปิด พร้อมทั้งมีการบรรจุแก๊สไนโตรเจนจึงทำให้แก๊สออกซิเจนมีปริมาณน้อย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบรุนแรงของน้ำมันหม้อแปลง แล้วก่อให้เกิดเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ กากตะกอนหรือคราบเหนียวที่ส่งผลทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันฉนวนเพิ่มขึ้นจึงเกิดได้น้อย [64] โดยน้ำมันแร่มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 8.04 - 8.30 เซนติสโตก ขณะที่ FR3 มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 32.26 - 33.78 เซนติสโตก และ EnPAT มีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 40.53 - 41.71 เซนติสโตก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติ ทั้ง FR3 และ EnPAT มีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันแร่ค่อนข้างมากประมาณ 3-5 เท่า เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีความแตกต่างกัน โดยน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักเป็นไตรกลีเซอไรด์จำนวนมาก ขณะที่น้ำมันแร่โดยส่วนใหญ่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก [82] อย่างไรก็ตาม EnPAT มีค่าความหนืดสูงกว่า FR3 เนื่องจาก EnPAT มีพื้นฐานมาจากน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งแตกต่างจาก FR3 มีพื้นฐานมาจากน้ำมันถั่วเหลือง ที่มีปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่ากรดไขมันอิ่มตัว [28] ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ FR3 มีค่าความหนืดน้อยกว่า



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าความทนไฟของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.1.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 30 วัน (720 ชม.) ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าค่าความหนืดของน้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง แต่มีค่าความหนืดมากกว่าน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยน้ำมันแรมมีค่าความหนืด 9.45 เซนติสโตก ส่วน FR3 มีค่าความหนืด 34.37 เซนติสโตก ขณะที่ EnPAT มีค่าความหนืด 42.97 เซนติสโตก ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของทั้งน้ำมันและกระดาษฉนวน ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพปนเปื้อนในน้ำมัน เช่น สารประกอบฟูแรน และกรดต่างๆ [83] เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดยังส่งผลทำให้การระบายความร้อนของน้ำมันฉนวนลดลง อีกทั้งยังเป็นการไปเร่งทำให้น้ำมันและกระดาษฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น

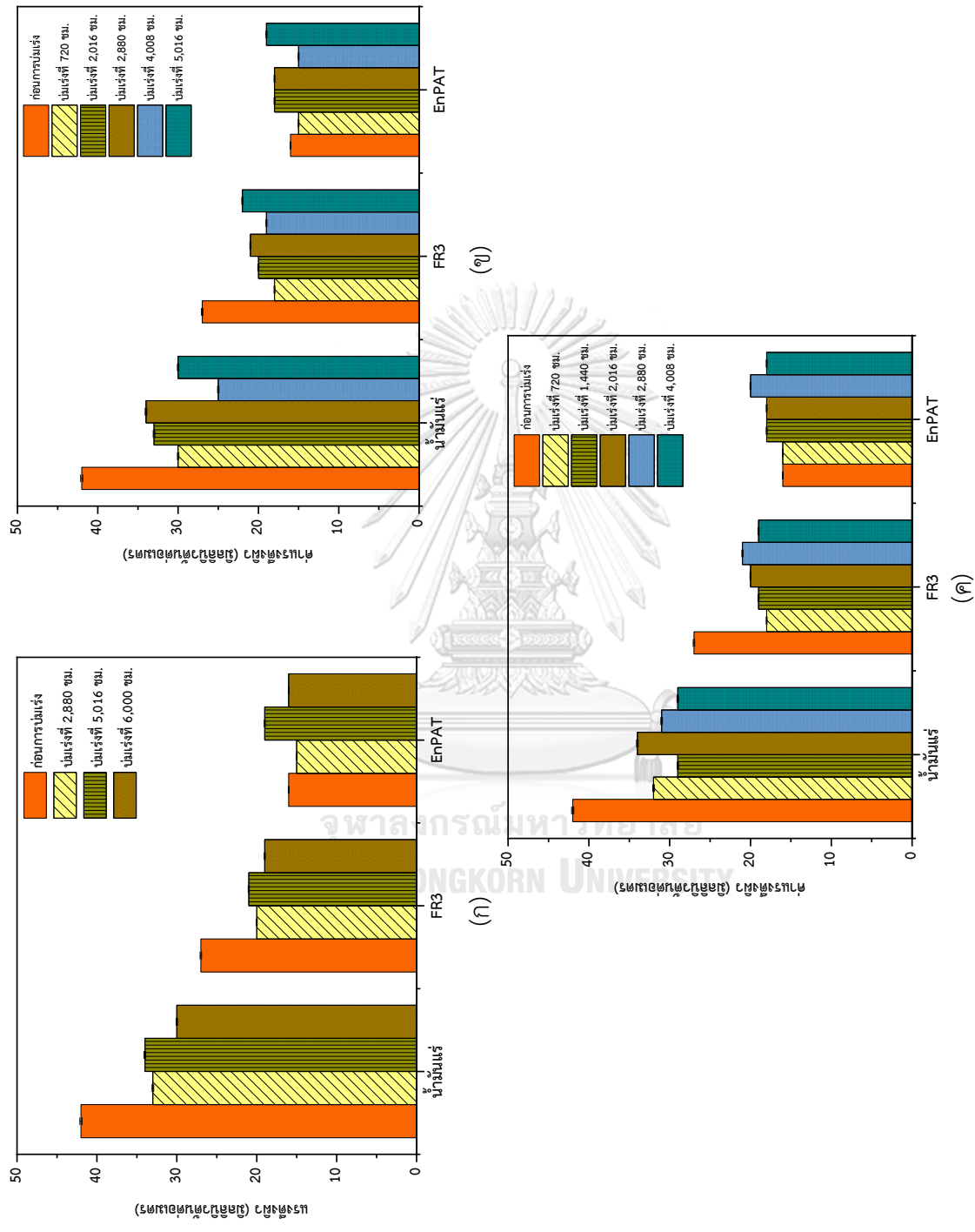
**ตารางที่ 4.3** ความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	ความหนืด (เซนติสโตก)		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแรม	8.22 ± 0.41	8.04 ± 0.40	9.45 ± 0.47
FR3	32.67 ± 1.63	33.04 ± 1.65	34.37 ± 1.72
EnPAT	40.53 ± 2.03	41.14 ± 2.06	42.97 ± 2.15

### 4.1.3 แรงตึงผิว

#### 4.1.3.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองพบว่าก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน ค่าแรงตึงผิวของน้ำมันแร่มีค่ามากกว่าน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ (FR3 และ EnPAT) เนื่องจากการทดสอบแรงตึงผิวจะเป็นการวัดแรงต้านระหว่างชั้นน้ำมันกับชั้นของน้ำ ซึ่งน้ำมันแร่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ ดังนั้นน้ำมันแร่จึงมีค่าแรงตึงผิวสูงถึง 42 มิลลินิวตันต่อเมตร ขณะที่น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ พบว่า EnPAT มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่า FR3 เนื่องจากปริมาณสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมสภาพใน EnPAT มีค่ามากกว่า FR3 โดยสารประกอบเหล่านี้จะทำให้แรงตึงผิวมีค่าลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามภายหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าค่าแรงตึงผิวของน้ำมันแร่ และ FR3 มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเร่งมากขึ้น เนื่องจากหลังจากผ่านการบ่มเร่ง น้ำมันฉนวนทั้ง 2 ชนิดจะเกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสารประกอบมีขั้วที่เกิดขึ้นในน้ำมันฉนวน [83] ขณะที่ EnPAT มีค่าแรงตึงผิวคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงทั้ง 3 อุณหภูมิการบ่มเร่งตลอดระยะเวลาการบ่มเร่ง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้น้อยจากการเติมสารยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน อีกทั้งโครงสร้างภายในมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวจำนวนมาก ซึ่งแสดงถึงการมีพันธะคู่ในโครงสร้างน้อย ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงเกิดการปนเปื้อนในน้ำมันมีน้อย จึงส่งผลทำให้ค่าแรงตึงผิวของ EnPAT ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดย EnPAT มีค่าแรงตึงผิวอยู่ระหว่าง 15 – 20 มิลลินิวตันต่อเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 2,880 – 6,000 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันแร่มีค่าแรงตึงผิวลดลงอยู่ในช่วง 19 – 29% และ FR3 มีค่าแรงตึงผิวมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 22 – 30% ดังแสดงในรูปที่ 4.2ก ขณะที่การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 720 – 5,016 ชั่วโมง พบว่าค่าแรงตึงผิวของน้ำมันแร่ และ FR3 มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 19 – 40% และ 19 – 33% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2ข นอกจากนี้ที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 150 องศาเซลเซียส นาน 720 – 4,008 ชั่วโมง พบว่าค่าแรงตึงผิวของน้ำมันแร่มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 19 – 31% และ FR3 มีค่าแรงตึงผิวลดลงอยู่ในช่วง 22 – 33% ดังแสดงในรูปที่ 4.2ค



รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปนเปื้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าแรงดึงผิวของน้ำมันแร่แปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C



## 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าก่อนและหลังการบ่มเร่งที่ ภาวะต่างๆ

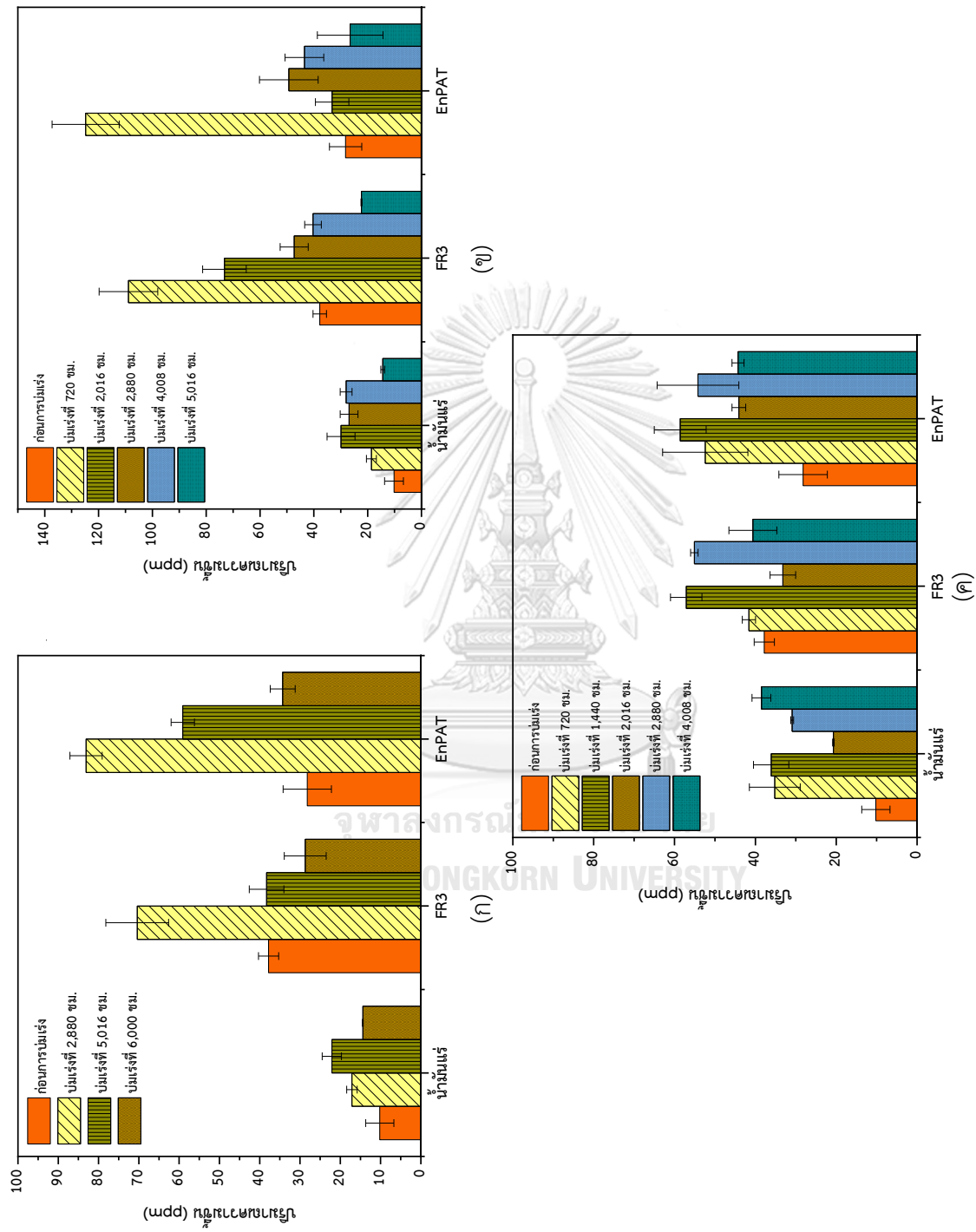
### 4.2.1 ปริมาณความชื้น

#### 4.2.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นของน้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ เมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของทั้งน้ำมันแร่และน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ โดยเกิดมาจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา [5] และนอกจากนี้ยังเกิดมาจากการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลสของกระดาษฉนวนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้วถูกปลดปล่อยออกมาสู่น้ำมันฉนวนด้วยกระบวนการแพร่ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณความชื้นในน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิ เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นในน้ำมันแร่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส น้ำมันแร่มีปริมาณความชื้นมากกว่า 30 ppm ยกเว้นการบ่มเร่งที่ระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นในน้ำมันแร่มีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นใน FR3 และ EnPAT เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันแร่มีความสมมาตร (symmetry) อีกทั้งยังประกอบด้วยพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน และพันธะคาร์บอนกับไฮโดรเจน [84] ซึ่งส่งผลให้น้ำมันแร่ไม่มีขั้วจึงมีความสามารถดูดซับน้ำได้น้อย ขณะที่น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ปริมาณมาก เนื่องจากหมู่เอสเทอร์ (COOR) ในโครงสร้างมีขั้ว จึงทำให้สามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำที่มีขั้วเช่นกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งส่งผลให้มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงกว่าน้ำมันแร่ [85] แต่ในบางช่วงระยะเวลาการบ่มเร่งปริมาณความชื้นของ FR3 และ EnPAT มีค่าลดลง ดังเช่นการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส หลังระยะเวลาผ่านไป 2,880 และ 720 ชั่วโมง ตามลำดับ และที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 150 องศาเซลเซียส นาน 2,016 และ 4,008 ชั่วโมง เนื่องจากน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งต้องใช้น้ำในการเกิดปฏิกิริยา แล้วได้

ผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระออกมา ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT ที่แสดงค่าเพิ่มขึ้นหลังผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน (รูปที่ 4.4) ซึ่งจะถูกอธิบายในลำดับถัดไป





รูปที่ 4.3 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปนเปื้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อปริมาณความเข้มข้นของน้ำดื่มที่ปนเปื้อนแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.2.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของน้ำมันทุกชนิดหลังจากผ่านการบ่มเร่งในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นของน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยน้ำมันแรมมีปริมาณความชื้น 37.1 ppm ขณะที่ FR3 และ EnPAT มีปริมาณความชื้น 59.1 และ 82.6 ppm ตามลำดับ เนื่องจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนในระบบที่มีปริมาณแก๊สออกซิเจนมาก ยิ่งไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและกระดาษฉนวน ซึ่งส่งผลทำให้อัตราการตัดขาดของสายโซ่เซลลูลอสของกระดาษฉนวนเกิดขึ้นมากกว่า [83] เมื่อเทียบกับการบ่มเร่งด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จะได้น้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นของน้ำมันทุกชนิดที่บ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีค่าสูงกว่า

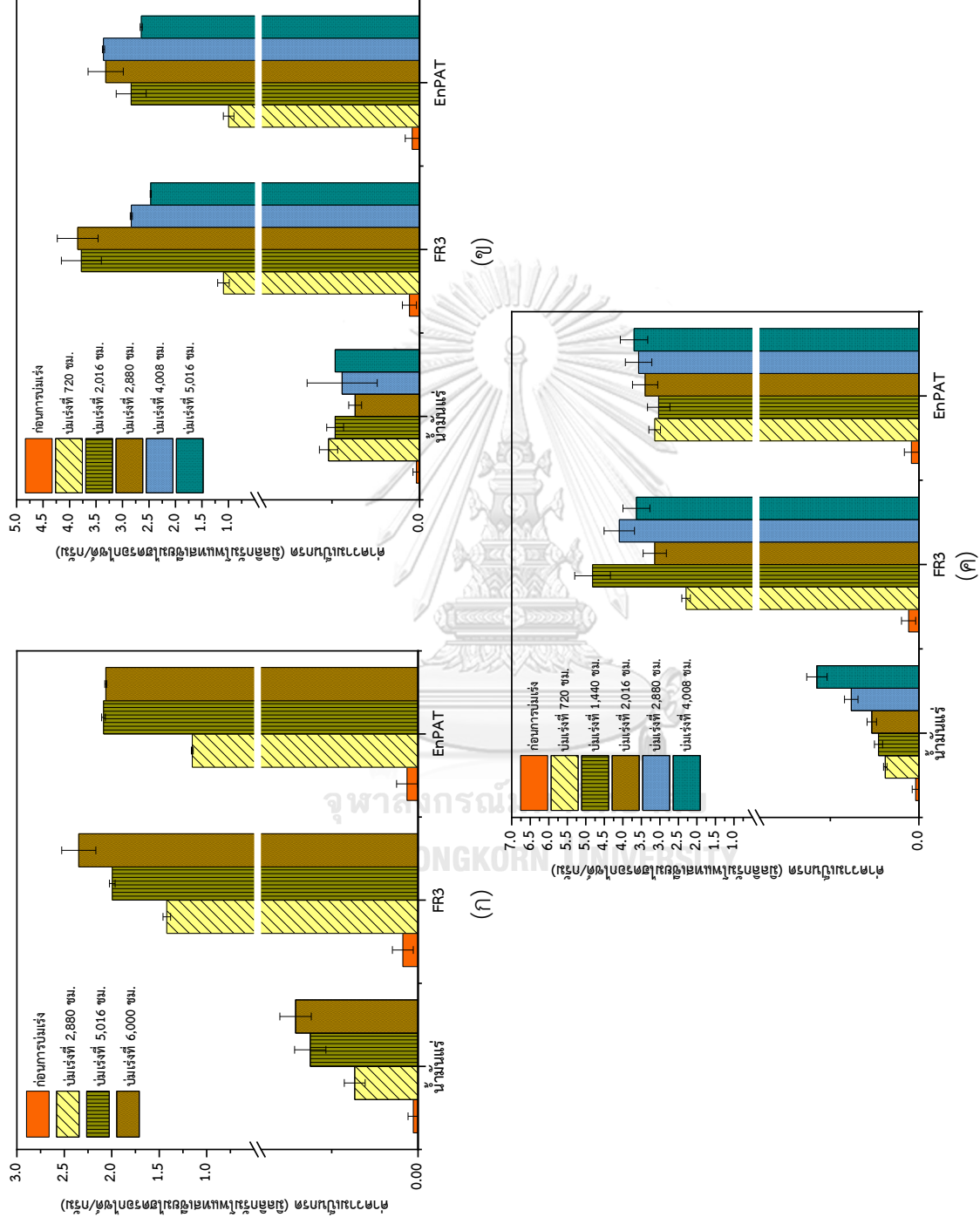
**ตารางที่ 4.4** ปริมาณความชื้นของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบกับบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	ปริมาณความชื้น (ppm)		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแรม	10.2 ± 3.5	35.2 ± 6.3	37.1 ± 4.0
FR3	37.8 ± 2.5	41.6 ± 1.6	59.9 ± 1.0
EnPAT	28.2 ± 6.0	52.4 ± 10.5	82.6 ± 5.0

## 4.2.2 ค่าความเป็นกรด

### 4.2.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองพบว่าก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อนค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT มีค่าสูงกว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันแร่ โดย FR3 และ EnPAT มีค่าความเป็นกรด 0.029 และ 0.021 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม ตามลำดับ ขณะที่น้ำมันแร่มีค่าความเป็นกรดเพียง 0.009 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม เนื่องจากภายในโครงสร้างของน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติประกอบด้วยกรดไขมัน 3 โมเลกุล จึงส่งผลทำให้มีค่าความเป็นกรดสูง [35] แต่หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เนื่องจากในระหว่างการบ่มเร่งด้วยความร้อน กรดเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันและกระดาชนวนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิส อย่างไรก็ตามภายหลังจากการบ่มเร่งทั้ง 3 อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT มีค่าสูงกว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันแร่อย่างเห็นได้ชัด โดย FR3 และ EnPAT มีค่าความเป็นกรดอยู่ระหว่าง 1.0 – 5.0 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม ขณะที่น้ำมันแร่มีค่าความเป็นกรดอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.3 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม เนื่องจากกรดที่เกิดขึ้นในน้ำมันฉนวนหลังการเสื่อมสภาพมีทั้งกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight acid) และกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (high molecular weight acid) [83] โดยกรดที่เกิดขึ้นในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระจำนวนมาก เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มิติก กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และกรดแอลฟาไลโนเลนิก ในทางกลับกันกรดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในน้ำมันแร่จะเป็นกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กรดฟอร์มิก กรดแอสिटิก และกรดเลวูลินิก เมื่อเทียบกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่เกิดขึ้นน้อย เช่น กรดสเตียริก และกรดแนพทานิก [86] ดังนั้นจึงทำให้ค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT มีค่าสูงกว่าน้ำมันแร่



รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปิ้งแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าความเป็นกรดของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.2.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน น้ำมันทุกชนิดมีค่าความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรดของน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบ่มเร่ง ค่าความเป็นกรดของน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน มีค่าเพิ่มขึ้น 27, 144 และ 238 เท่า ตามลำดับ ขณะที่ค่าความเป็นกรดของน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน มีค่าเพิ่มขึ้น 10, 81 และ 150 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ปริมาณแก๊สออกซิเจนจำนวนมากในระบบจะไปเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของน้ำมันและกระดาษฉนวนอย่างมากด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์กรดต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวจะไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสใน FR3 และ EnPAT แล้วเกิดเป็นกรดไขมันอิสระจำนวนมาก ดังนั้นจึงทำให้ค่าความกรดเป็นของน้ำมันเพิ่มขึ้นสูงมาก ซึ่งแตกต่างจากการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่แก๊สออกซิเจนมีปริมาณน้อย ดังนั้นการเสื่อมสภาพของน้ำมันและกระดาษฉนวนจึงเกิดขึ้นช้ากว่า จึงส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันมีค่าน้อยกว่า

**ตารางที่ 4.5** ค่าความเป็นกรดของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม)		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแร่	0.009 ± 0.01	0.095 ± 0.01	0.245 ± 0.02
FR3	0.028 ± 0.02	2.293 ± 0.11	4.037 ± 0.40
EnPAT	0.021 ± 0.02	3.139 ± 0.16	5.018 ± 0.50

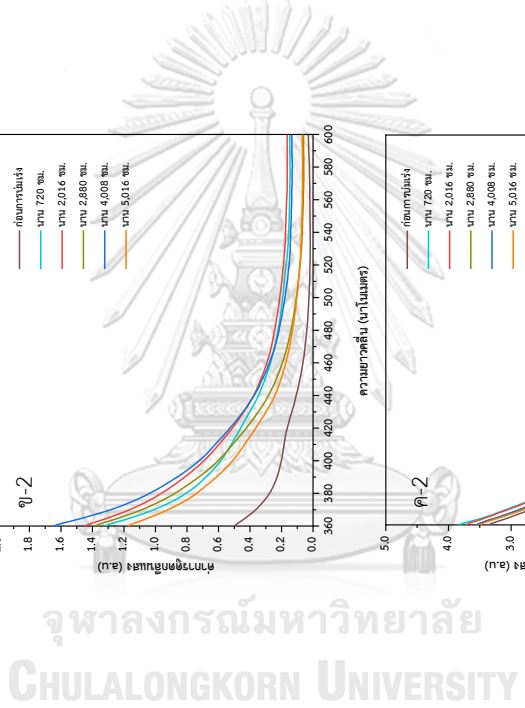
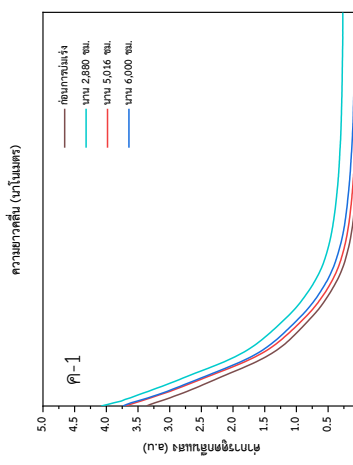
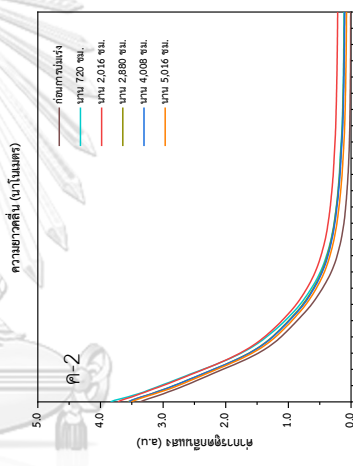
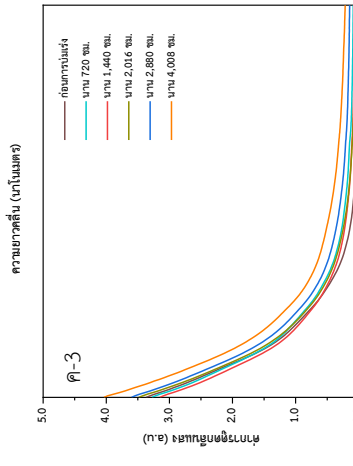
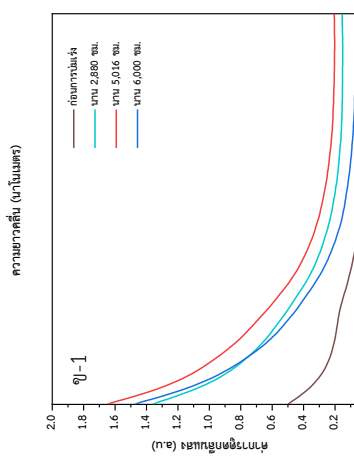
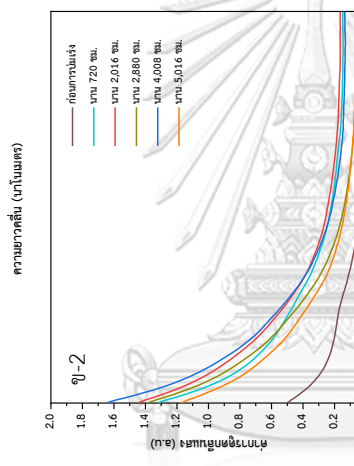
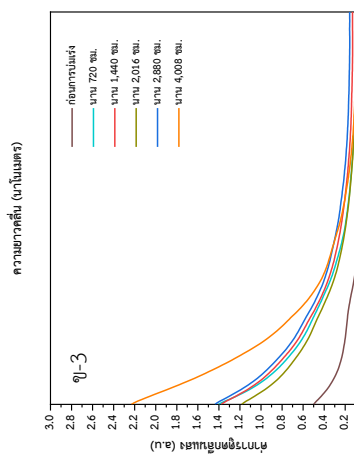
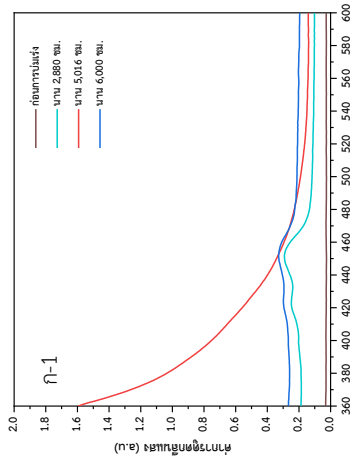
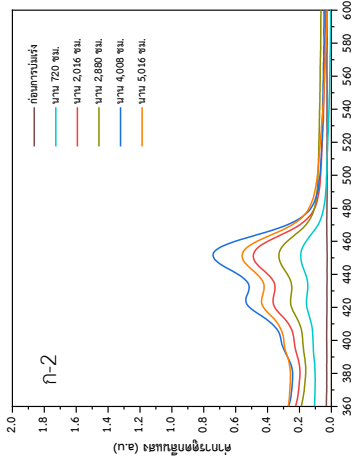
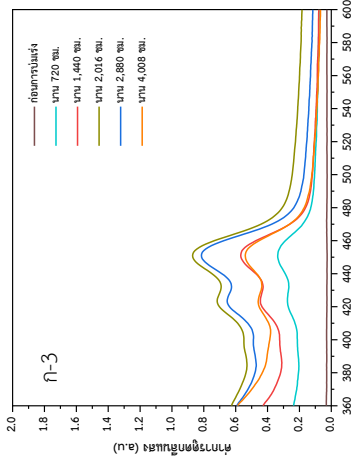
#### 4.2.3 ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันฉนวน

##### 4.2.3.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

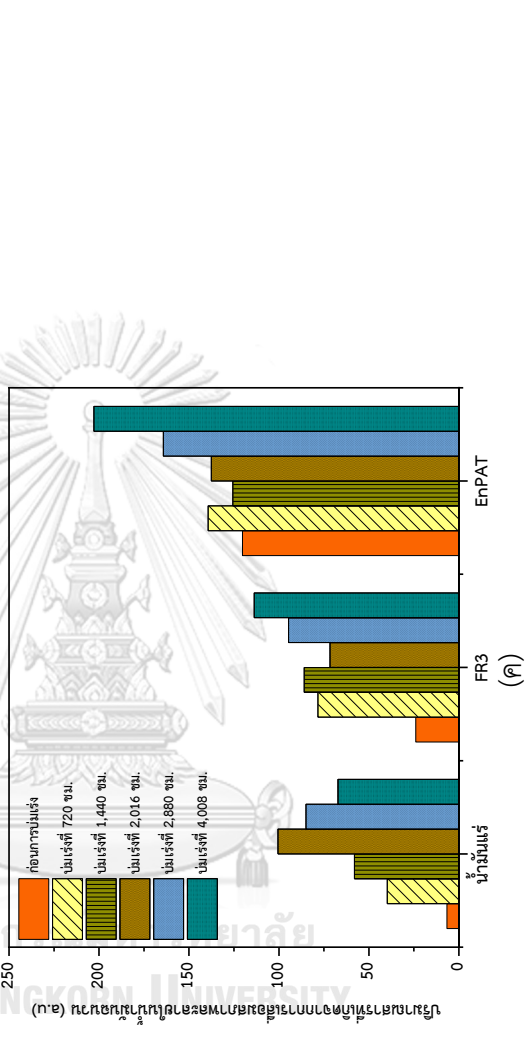
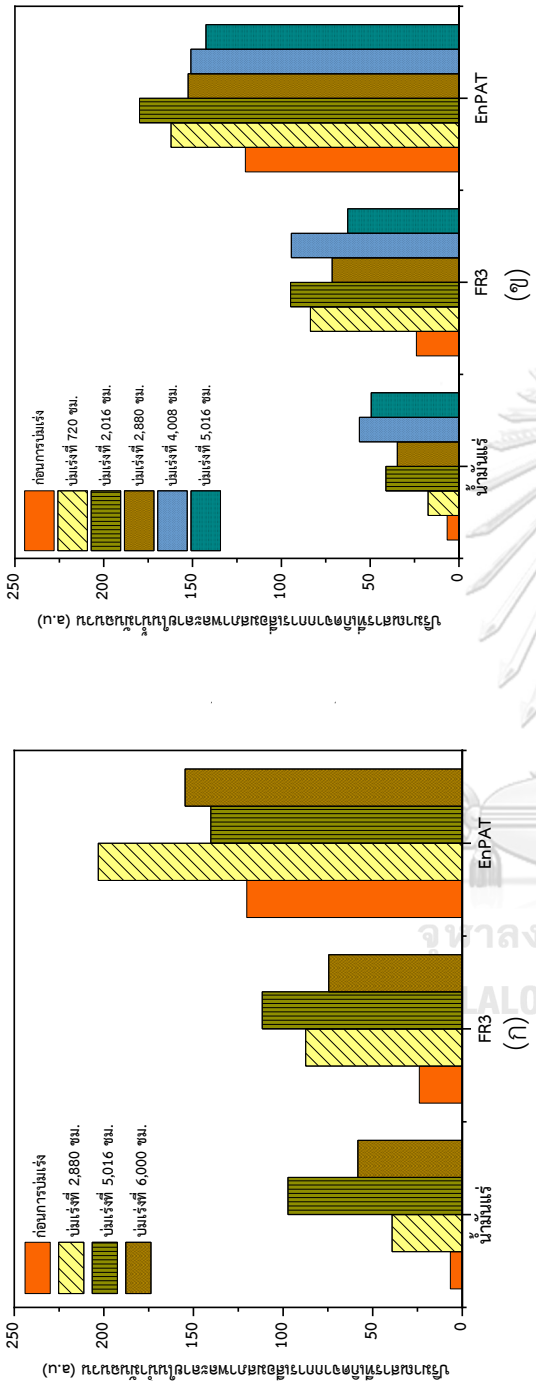
ปริมาณสารที่เกิดจากเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น ได้แก่ เปอร์ออกไซด์ แอลดีไฮด์ คีโตน และกรดอินทรีย์ โดยสารประกอบเหล่านี้จะละลายอยู่ในน้ำมันฉนวน และบางส่วนถูกดูดซับไว้บนกระดาษฉนวน ซึ่งเป็นการไปเร่งการเสื่อมสภาพของน้ำมันและกระดาษฉนวน [87] โดยน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการใช้งานจะมีปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายอยู่ในน้ำมันฉนวนน้อย แต่หลังจากผ่านการใช้งานน้ำมันจะเกิดการเสื่อมสภาพจะมีปริมาณสารที่เกิดการเสื่อมสภาพละลายอยู่ในน้ำมันเพิ่มขึ้น [88] ซึ่งจากรูปที่ 4.5 แสดงเส้นโค้งการดูดกลืนแสง UV ของน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ในช่วงความยาวคลื่นแสง 360 – 600 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งการดูดกลืนแสงของน้ำมันแต่ละชนิดไปตามความยาวคลื่นแสง ซึ่งบ่งบอกได้ว่าสารที่เกิดการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันฉนวนมีปริมาณเพิ่มขึ้น และสีของน้ำมันฉนวนเข้มขึ้น โดยคำนวณหาได้จากพื้นที่ใต้เส้นโค้งการดูดกลืนแสง [89] จากผลการทดลองพบว่าก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อนปริมาณสารที่เกิดการเสื่อมสภาพที่ละลายใน EnPAT มีปริมาณมากที่สุด เนื่องจาก EnPAT มีพื้นฐานมาจากน้ำมันปาล์มที่มีประกอบสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoid) เป็นองค์ประกอบปริมาณสูง ซึ่งสารกลุ่มดังกล่าวสามารถดูดกลืนแสง UV ได้มาก [90] ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพใน EnPAT มีค่ามากกว่าน้ำมันแร่ และ FR3 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิ ที่ระยะเวลาต่างๆ ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายอยู่ในน้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง โดยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 5.9 – 14.6 เท่า ส่วนปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพใน FR3 มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 3.1 – 4.7 เท่า และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพใน EnPAT มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 1.2 – 1.7 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ขณะทำการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้น 2.6 – 8.4 เท่า ส่วนปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพใน FR3 และ EnPAT มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 2.6 – 4.0 เท่า และ 1.2 – 1.5 เท่า ตามลำดับ



ดังแสดงในรูปที่ 4.6ข นอกจากนี้การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันแร่มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 6.0 – 15.1 เท่า ขณะที่ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพใน FR3 มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 3.0 – 4.7 เท่า และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพใน EnPAT มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 1.0 – 1.7 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.6ค อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายใน EnPAT หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ และ FR3 เนื่องจากโครงสร้างของน้ำมันชีวภาพฐานพาล์มประกอบด้วยปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวมาก และความสามารถของสารเติมแต่งในกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิลที่ถูกเติมเข้าไปช่วยเพิ่มความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชัน โดยการไปยับยั้งและยุติการก่อตัวของอนุมูลอิสระของปฏิกิริยาออกซิเดชัน [91] ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลทำให้ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพใน EnPAT เพิ่มขึ้นน้อย



รูปที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนแสง UV ของ (ก) น้ำมันแร่ (ข) น้ำมันแร่ (ง) EnPAT ก่อนและหลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ (1) 110°C (2) 130°C และ (3) 150°C



รูปที่ 4.6 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการป่นแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพและลายในน้ำมีหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.2.3.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าภายหลังจากการบ่มเร่งปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง นอกจากนี้น้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เนื่องจากในระบบที่มีปริมาณแก๊สออกซิเจนมากทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันจนวนได้มากกว่าระบบที่มีแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะส่งผลทำให้ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันจนวนมีค่ามาก โดยการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT มีค่าเพิ่มขึ้น 82.5, 8.5 และ 2.5 เท่า ตามลำดับ ขณะที่การบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT มีค่าเพิ่มขึ้น 6.0, 3.3 และ 1.2 เท่า ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.6** ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน

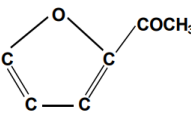
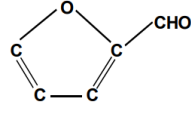
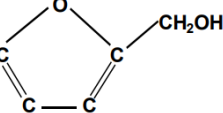
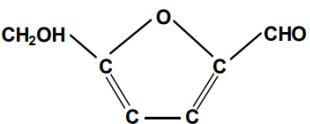
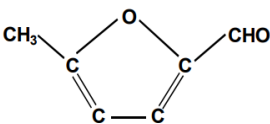
ชนิดของน้ำมัน	ปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันจนวน (a.u)		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแร่	6.65	39.82	548.52
FR3	23.95	78.33	203.54
EnPAT	120.26	139.36	304.80

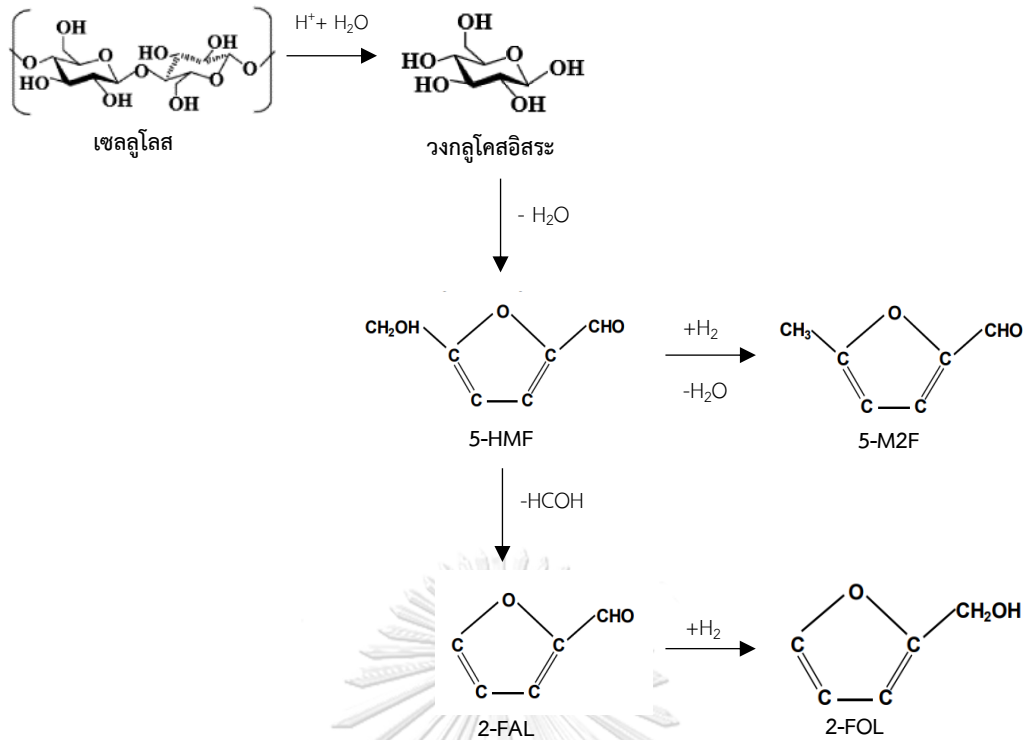
#### 4.2.4 ปริมาณสารประกอบฟูแรน

เมื่อกระดาดจนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาไพโรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยมีความร้อนสูง ปริมาณความชื้น กรด และออกซิเจนสูงเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาเหล่านั้น ซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างของกระดาดจนวนจนก่อให้เกิดสารประกอบฟูแรนขึ้น แล้วปลดปล่อยออกมาแล้วละลายอยู่

ในน้ำมันถั่ว [56] ซึ่งสารประกอบฟูแรนที่เกิดขึ้นนั้นมีจำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่จะไม่มีกลิ่น ดังนั้นจึงมีสารประกอบฟูแรนเพียง 5 ชนิดเท่านั้น ที่โดยทั่วไปถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์บ่งบอกถึงสาเหตุการเสื่อมสภาพของกระดาษที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งในการเกิดสารประกอบฟูแรนจะเริ่มต้นจากการกระดาษถั่วถั่วเกิดการเสื่อมสภาพ จึงทำให้เกิดการตัดขาดระหว่างสายโซ่เซลลูโลสเกิดเป็นวงกลูโคสอิสระ โดยภายใต้อิทธิพลของน้ำและกรดจะส่งผลให้วงกลูโคสอิสระเกิดการเชื่อมสลายต่อกลายเป็นสารประกอบฟูแรนชนิด 5-HMF แต่สารประกอบฟูแรนชนิดนี้ไม่เสถียรจึงเกิดปฏิกิริยาต่อกลายเป็นสารประกอบฟูแรนชนิด 2-ACF, 2-FAL และ 5-M2F [92-94] นอกจากนี้สารประกอบฟูแรนชนิด 2-FAL ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อกลายเป็นสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FOL [95] ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สาเหตุการเกิดสารประกอบฟูแรนชนิดต่างๆ

ชื่อสารประกอบฟูแรน	โครงสร้างทางเคมี	สาเหตุที่พบในหม้อแปลงไฟฟ้า
2-acetylfuran (2-ACF)		ไม่ระบุสาเหตุ เกิดได้ยาก
2-furfuraldehyde (2-FAL)		การเสื่อมสภาพทางความร้อนโดยปกติ
2-furfuryl-alcohol (2-FOL)		ปริมาณความชื้นสูง
5-hydroxy-methyl-furfural (5-HMF)		การเกิดออกซิเดชัน
5-methyl-2-furfuraldehyde (5-M2F)		ความร้อนรุนแรง



รูปที่ 4.7 การเกิดสารประกอบฟูแรนชนิดต่างๆ

#### 4.2.4.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิดต่างๆ เกิดขึ้นในน้ำมันแต่ละชนิดหลังจากผ่านการบ่มเร่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 2,880 – 6,008 ชั่วโมง พบปริมาณสารประกอบทั้ง 5 ชนิดในน้ำมันทุกชนิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยการบ่มเร่งที่ระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง น้ำมันแร่พบปริมาณสารฟูแรนชนิด 2-ACF และ 2-FAL มีค่า < 10 ppb และปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FOL มีค่า 48 ppb ขณะที่ FR3 และ EnPAT ไม่พบปริมาณสารประกอบฟูแรนดังกล่าว ยกเว้น EnPAT ที่พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 5-HMF มีค่า < 10 ppb นอกจากนี้การบ่มเร่งที่ระยะเวลา 5,016 ชั่วโมง น้ำมันแร่พบปริมาณสารฟูแรนชนิด 2-FAL และ 2-FOL มีค่า < 10 และ 33 ppb ตามลำดับ ในส่วนของ FR3 พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-ACF มีค่า 14 ppb และปริมาณสารประกอบชนิด 2-FOL และ 2-FAL มีค่า < 10 ppb ขณะที่ EnPAT ไม่พบสารประกอบฟูแรนเกิดขึ้น ส่วนการบ่มเร่งที่ระยะเวลา 6,008 ชั่วโมง น้ำมันแร่และ FR3 พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-ACF มีค่า 11 และ < 10 ppb ตามลำดับ

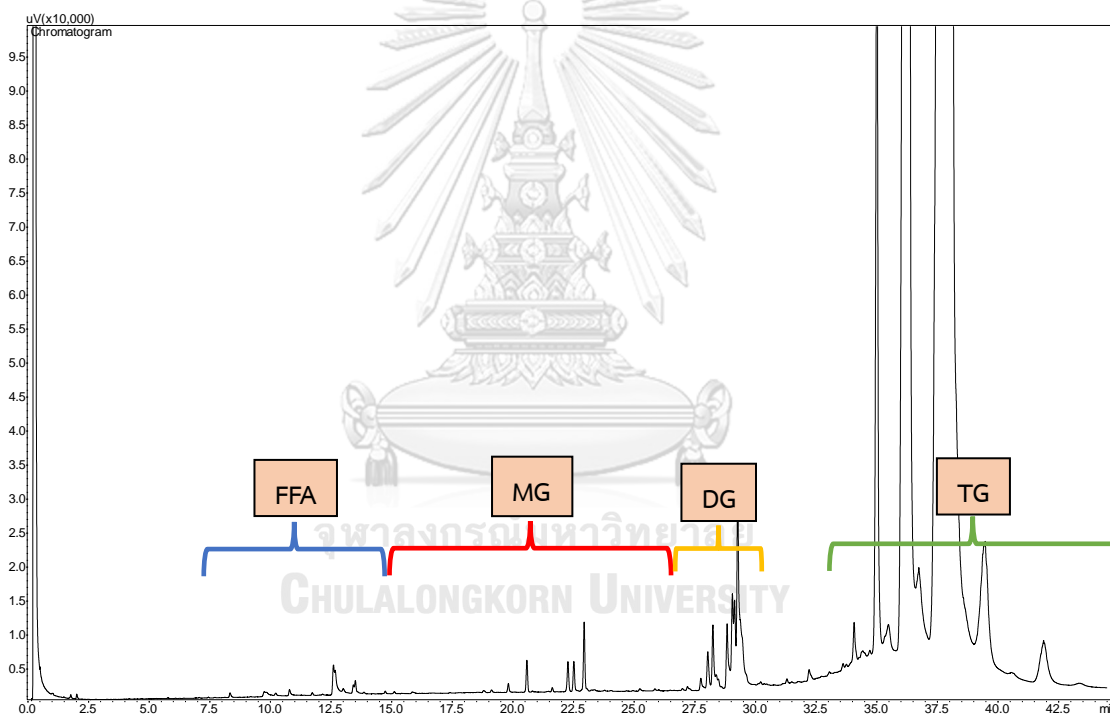
ขณะที่ EnPAT พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FAL และ 2-FOL มีค่า < 10 ppb อย่างไรก็ตามน้ำมันทั้ง 3 ชนิดนี้ไม่พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 5-M2F ตลอดระยะเวลาการบ่มเร่ง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเร่งนี้ไม่สูงมาก ส่วนของการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 720 – 5,016 ชั่วโมง พบว่าที่ระยะเวลาผ่านไป 720 ชั่วโมง น้ำมันแร่ และ EnPAT พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FOL มีค่า 88 และ < 10 ppb ตามลำดับ ขณะที่ FR3 ไม่พบสารประกอบชนิดดังกล่าว แต่หลังจากผ่านการบ่มเร่งที่ระยะเวลา 2,016 – 5,016 ชั่วโมง น้ำมันแร่พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FOL เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ที่ระยะเวลา 2,016 และ 2,880 โดยมีค่า 467 และ 537 ppb ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-ACF และ 2FAL มีค่า < 10 ppb และสารประกอบฟูแรนชนิด 5-M2F มีค่า 25 ppb ขณะที่ FR3 พบเพียงปริมาณสารประกอบชนิด 2-FOL และ 5-HMF มีค่า < 10 ppb และ EnPAT ที่พบปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-FAL และ 5-HMF เท่านั้น มีค่า < 10 ppb ส่วนการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 – 4,008 ชั่วโมง พบสารประกอบฟูแรนทั้ง 5 ชนิดในน้ำมันแร่มีปริมาณมากกว่าใน FR3 และ EnPAT อย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง เป็นต้นไป โดยน้ำมันแร่มีปริมาณสารประกอบฟูแรนชนิด 2-ACF, 2FAL, 5-HMF และ 5-M2F มีค่า 1,145 – 4,262, 636 – 3,510 , 1,332 – 1,419, 737 – 1,081 ppb ตามลำดับ ขณะที่สารประกอบฟูแรนชนิด 2-FOL พบในปริมาณมากตั้งแต่ระยะเวลา 1,440 ชั่วโมง เป็นต้น โดยมีค่า 3,335 – 13,831 ppb ขณะที่สารประกอบฟูแรนทั้ง 5 ชนิดที่เกิดใน FR3 และ EnPAT ตรวจไม่พบหรือเกิดขึ้นปริมาณน้อยมากเท่านั้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าสารประกอบฟูแรนส่วนใหญ่ที่พบในน้ำมันแร่สุด คือ 2-FOL เนื่องจากหลังจากผ่านการบ่มเร่ง ความชื้นในน้ำมันแร่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น แต่เนื่องด้วยน้ำมันแร่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยกว่ากระดาษฉนวน จึงเป็นสาเหตุทำให้ความชื้นไปเร่งการทำลายโครงสร้างเซลล์ลอส ดังนั้นกระดาษฉนวนจึงเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว





#### 4.2.5 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติโดยใช้เทคนิค GC-FID การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติโดยใช้เทคนิค GC-FID ซึ่งจากโครมาโตแกรมที่เกิดขึ้นจะพบสัญญาณจำนวนมาก โดยจะแบ่งสัญญาณออกเป็น 4 ช่วงหลัก ได้แก่ สัญญาณที่ค่า retention time ที่ 7.0 – 15.2 นาที คือ กรดไขมันอิสระ (FFA) สัญญาณที่ค่า retention time ที่ 15.2 – 26.5 นาที คือ มอนอกลิเซอไรด์ (MG) สัญญาณที่ค่า retention time ที่ 26.5 – 29.5 นาที คือ ไดกลิเซอไรด์ (DG) และสัญญาณที่ค่า retention time ที่ 33.0 – 44.5 นาที คือ ไตรกลิเซอไรด์ (TG) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 โครมาโตแกรมขององค์ประกอบกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติ

##### 4.2.5.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

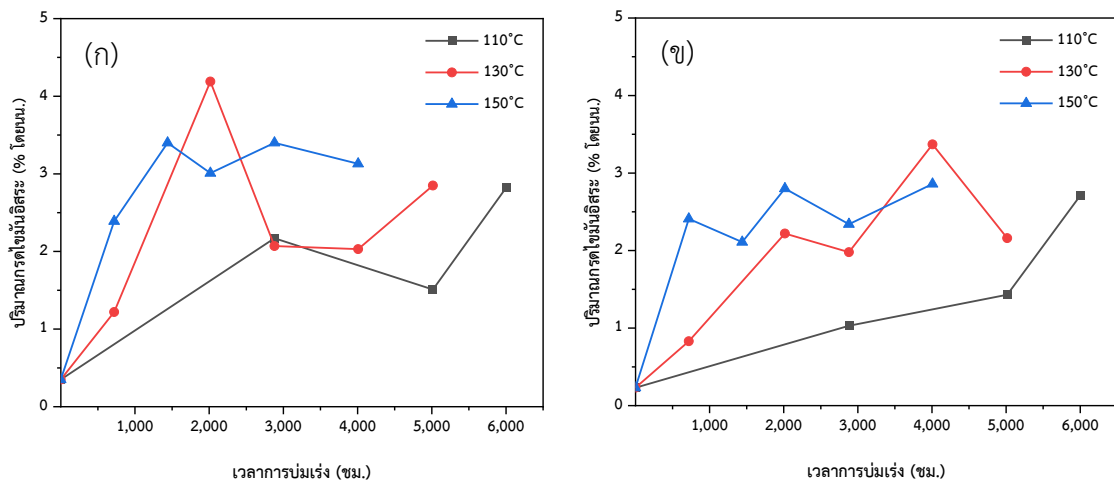
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อน ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆ ใน FR3 และ EnPAT มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากน้ำมันฉนวนทั้ง 2 ชนิดนี้มีพื้นฐานของน้ำมันที่แตกต่างกัน โดย FR3 มีปริมาณกรดไขมันชนิดไตรกลิเซอไรด์ ชนิดไดกลิเซอไรด์ และชนิดมอนอกลิเซอไรด์มีค่า 97.26%, 1.93% และ 0.45% ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.35% ขณะที่ EnPAT มีปริมาณกรดไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์ 91.72% ปริมาณกรดไขมันชนิดไดกลีเซอไรด์ 1.93% ปริมาณกรดไขมันชนิดมอนอกลิเซอไรด์ 0.29% และปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.23% ดังแสดงในตารางที่ 4.11

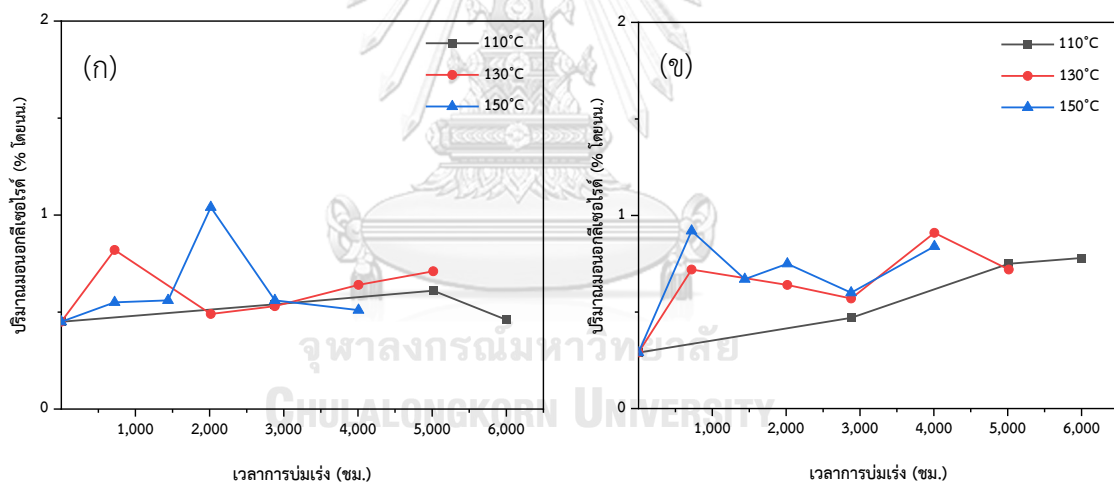
ภายหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยร้อนทั้งที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันทั้ง 2 ชนิด โดยปริมาณกรดไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ขณะที่ปริมาณกรดไขมันอิสระ กรดไขมันชนิดมอนอกลิเซอไรด์ และชนิดไดกลีเซอไรด์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 – 4.11 เนื่องจากในระหว่างการบ่มเร่งที่อุณหภูมิสูง FR3 และ EnPAT สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยน้ำที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นไตรกลีเซอไรด์ เกิดเป็นไดกลีเซอไรด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อจนได้เป็นมอนอกลิเซอไรด์ ซึ่งในการเกิดไฮโดรซิสแต่ละครั้งจะได้กรดไขมันอิสระออกมาด้วย ซึ่งกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะไปเร่งทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดต่อไปอย่างอัตโนมัติ [35] ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองที่ค่าความเป็นกรดของทั้ง FR3 และ EnPAT มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และปริมาณความชื้นมีค่าลดลงในระหว่างการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.9 ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆ ใน FR3 และ EnPAT ก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน

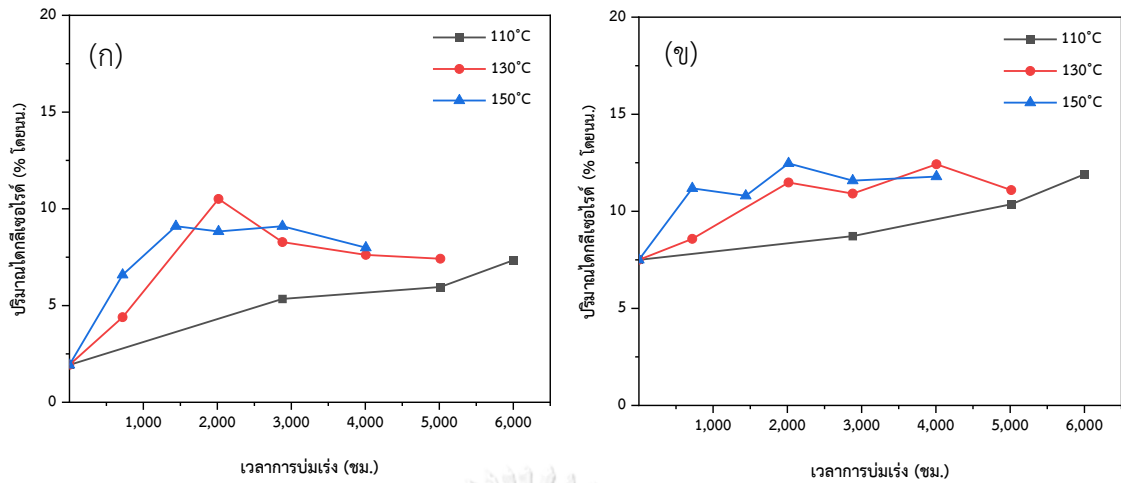
% องค์ประกอบของกรดไขมัน	ปริมาณองค์ประกอบต่างๆน้ำมันแต่ละชนิด	
	FR3	EnPAT
กรดไขมันอิสระ	0.35%	0.23%
มอนอกลิเซอไรด์	0.45%	0.29%
ไดกลีเซอไรด์	1.93%	7.50%
ไตรกลีเซอไรด์	97.26%	91.72%



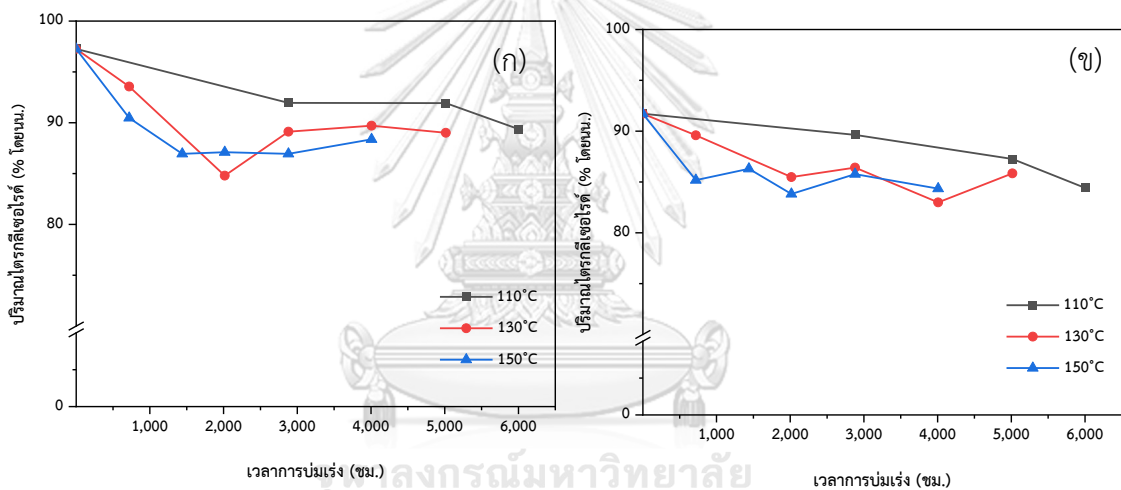
รูปที่ 4.9 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT



รูปที่ 4.10 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT



รูปที่ 4.11 ปริมาณโคกลีเซอไรด์ในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT



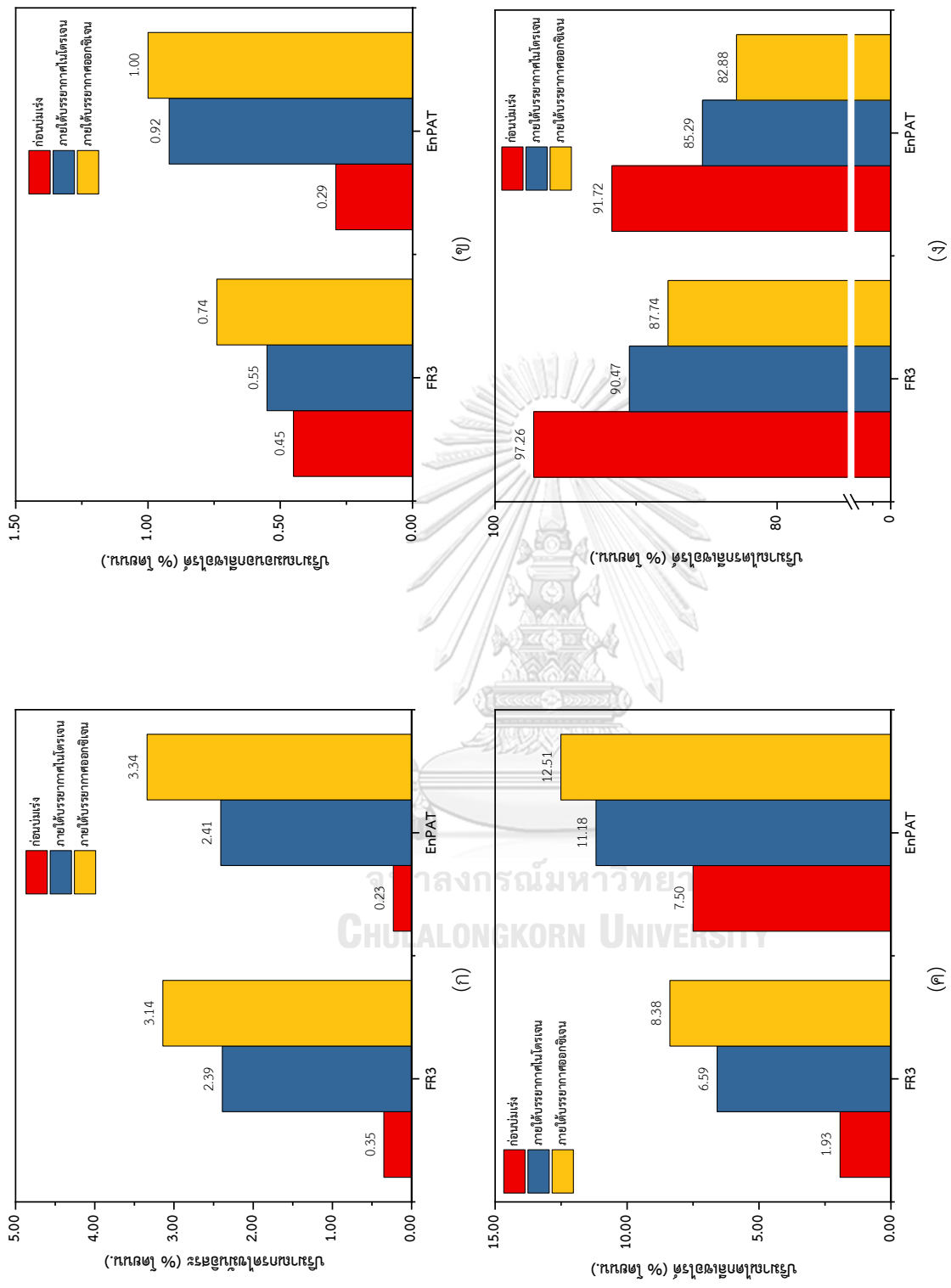
รูปที่ 4.12 ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส : (ก) FR3 และ (ข) EnPAT

#### 4.2.5.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากผลการทดลองการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันชนิดต่างๆ ทั้งใน FR3 และ EnPAT เมื่อเทียบกับก่อนการบ่มแรง อีกทั้งยังแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการบ่มแรงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบ่มแรงภายใต้บรรยากาศออกซิเจนของทั้ง FR3 และ EnPAT สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เช่นกัน โดยปริมาณกรดไขมันอิสระ กรดไขมันชนิดมอนอกลิเซอไรด์ และ

กรดไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13ก – 4.13ค ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของกรดไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.24ง อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ทั้ง FR3 และ EnPAT มีปริมาณของกรดไขมันอิสระ กรดไขมันชนิดมอนอกลิเซอไรด์ และกรดไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์มีค่ามากกว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ขณะที่ปริมาณกรดไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์มีค่าน้อยกว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังนั้นจึงสามารถบ่งบอกได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นมากกว่า เนื่องจากปริมาณแก๊สออกซิเจนจำนวนมากจะไปเร่งการเสื่อมสภาพของกระดาษจนวน ทำให้ได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ซึ่งน้ำเหล่านี้จะไปส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ FR3 และ EnPAT ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT ที่บ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีค่าสูงกว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน





**รูปที่ 4.13** ปริมาณคาร์บอนชนิดต่างๆใน FR3 และ EnPAT ก่อนและหลังการปิ้งด้วยความร้อนที่ 150°C นาน 720 ชม. ภายใต้อุณหภูมิที่ไม่ได้ระบุ  
 บรรยายการออกซิเจน : (ก) การดัดแปรอินทรีย์ (ข) มอนอกลีเซอไรด์ (ค) ไดกลีเซอไรด์ และ (ง) ไตรกลีเซอไรด์

### 4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง

#### 4.3.1 ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric breakdown voltage)

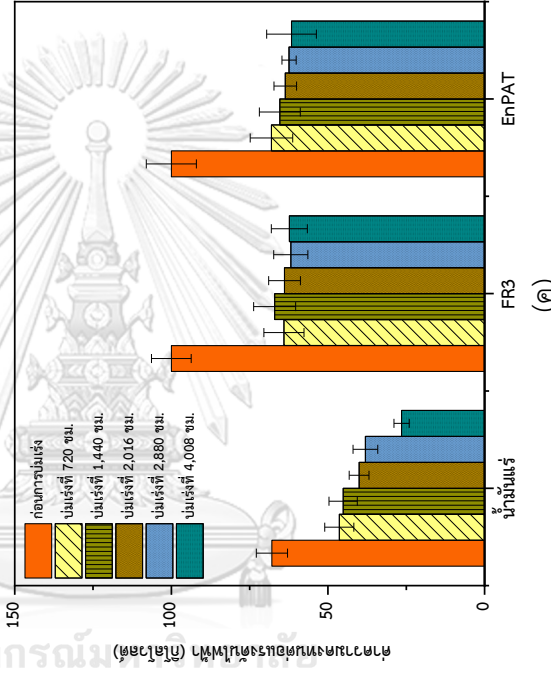
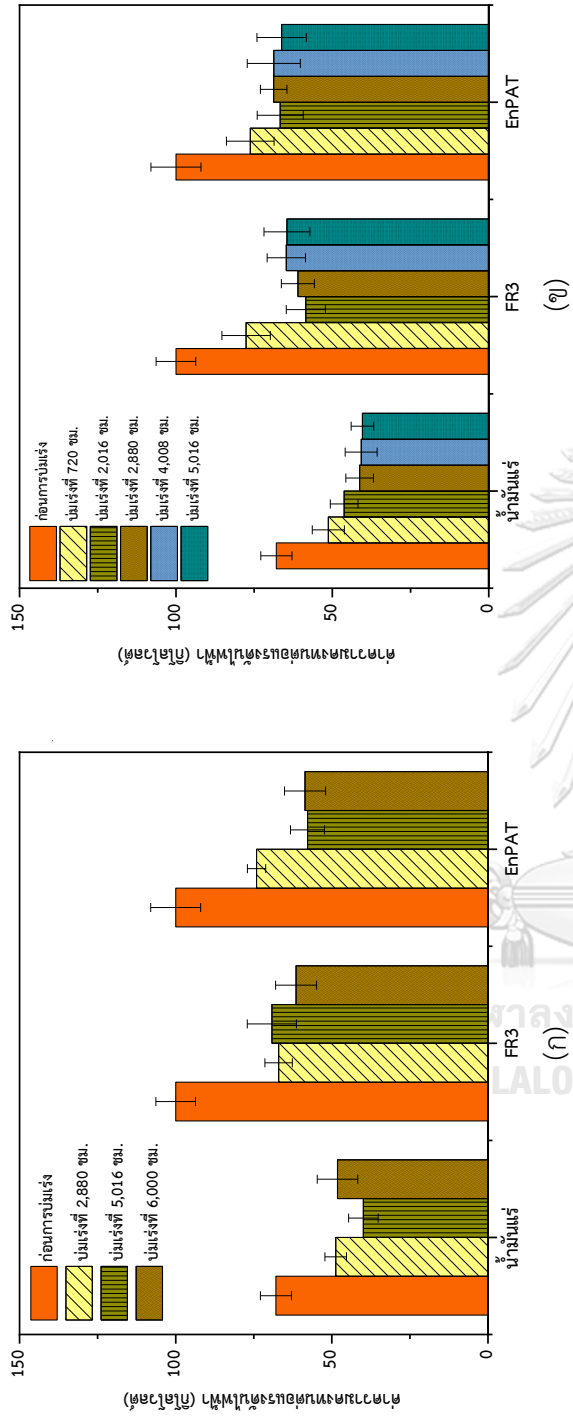
เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของตัวน้ำมันฉนวน ซึ่งค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจะมีความไวต่อคุณภาพของน้ำมัน โดยปกติจะมีค่าลดลง หากเกิดการปนเปื้อนภายในน้ำมันฉนวน เช่น ความชื้น ฟองอากาศ สิ่งเจือปนของแข็ง อนุภาคของตัวนำไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์กรดต่างๆ [63]

##### 4.3.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองพบว่าก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน น้ำมันแร่มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 67.90 กิโลโวลต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันกลุ่มเอสเตอรัลธรรมชาติ (FR3 และ EnPAT) ที่มีค่า >100 กิโลโวลต์ ถึงแม้ว่าน้ำมันแร่มีปริมาณความชื้นเพียง 10.2 ppm ขณะที่ FR3 และ EnPAT มีปริมาณความชื้น 37.8 และ 28.2 ppm ตามลำดับ เนื่องจากน้ำมันแร่ไม่มีขี้ แต่มีขี้ ดังนั้นปริมาณความชื้นเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันแร่วัดลงอย่างรวดเร็ว [54] แต่ภายหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันทุกชนิดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เนื่องจากหลังจากผ่านการบ่มเร่งน้ำมันเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้ปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด และปริมาณสารที่เกิดจากเสื่อมสภาพในน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิ ทั้ง FR3 และ EnPAT มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และยังคงมีค่ามากกว่าในน้ำมันแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 4,008 ชม. โดย FR3 และ EnPAT มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 62.33 และ 61.63 กิโลโวลต์ ตามลำดับ ขณะที่น้ำมันแร่มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพียง 26.51 กิโลโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14c ส่วนการบ่มเร่งที่อุณหภูมิและระยะเวลาอื่นๆ พบว่า FR3 และ EnPAT ยังคงมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่าน้ำมันแร่ เช่นเดียวกัน โดย FR3 และ EnPAT มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 58.48 – 77.57 กิโลโวลต์ และ 57.79 – 76.24 กิโลโวลต์ ตามลำดับ ขณะที่น้ำมันแร่มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 38.05 - 51.29 กิโลโวลต์ ถึงแม้ว่าปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้น

ภายหลังจากการบ่มเร่งของทั้ง FR3 และ EnPAT จะมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในน้ำมันแร่ เนื่องจากโครงสร้างของน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติมีความมีขี้ว ซึ่งมีแนวโน้มที่จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ จึงส่งผลทำให้ความชื้นสามารถละลายในน้ำมันกลุ่มนี้ได้ปริมาณมาก ดังนั้นน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติจึงมีความสามารถในการรับความชื้นได้สูง อีกทั้งหลังจากการบ่มเร่ง ค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT มีค่าสูงกว่าน้ำมันแร่ เนื่องด้วยกรดที่เกิดขึ้นเหล่านั้นเป็นกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับโมเลกุลของเอสเตอร์ธรรมชาติ จึงทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลใกล้เคียง ดังนั้นส่งผลให้ทำให้กรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจึงสามารถละลายและเข้ากันได้กับน้ำมันกลุ่มเอสเตอร์ธรรมชาติ นอกจากนี้กรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนสามารถละลายในเอสเตอร์ธรรมชาติได้ด้วยเช่นกัน เนื่องจากความมีขี้วเหมือนกัน [5] ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลทำให้ FR3 และ EnPAT ยังคงมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่าน้ำมันแร่ แม้ว่าจะมีปริมาณความชื้น และค่าความเป็นกรดสูงกว่าในน้ำมันแร่อย่างมาก





**รูปที่ 4.14** ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปิ้งแรงที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.3.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าภายหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน น้ำมันทุกชนิด มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงเช่นเดียวกับน้ำมันผ่านที่การบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แต่จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า โดยน้ำมันแรมมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 22.83 กิโลโวลต์ ขณะที่ FR3 มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 52.52 กิโลโวลต์ และ EnPAT มีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 58.82 กิโลโวลต์ เนื่องจากน้ำมันฉนวนทั้ง 3 ชนิดนี้มีการปนเปื้อนจากผลิตภัณฑ์ต่างๆ จำนวนมาก ซึ่งเกิดการเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและกระดาษฉนวนด้วยปริมาณแก๊สออกซิเจนสูงในระบบ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันฉนวนแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีค่ามากกว่าน้ำมันฉนวนที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

**ตารางที่ 4.10** ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เทียบบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์)		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแรม	67.90 ± 5.00	46.38 ± 4.64	22.83 ± 4.20
FR3	>100 ± 6.33	64.04 ± 6.40	52.52 ± 2.52
EnPAT	>100 ± 8.00	68.04 ± 6.80	58.82 ± 7.16

#### 4.3.2 ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก

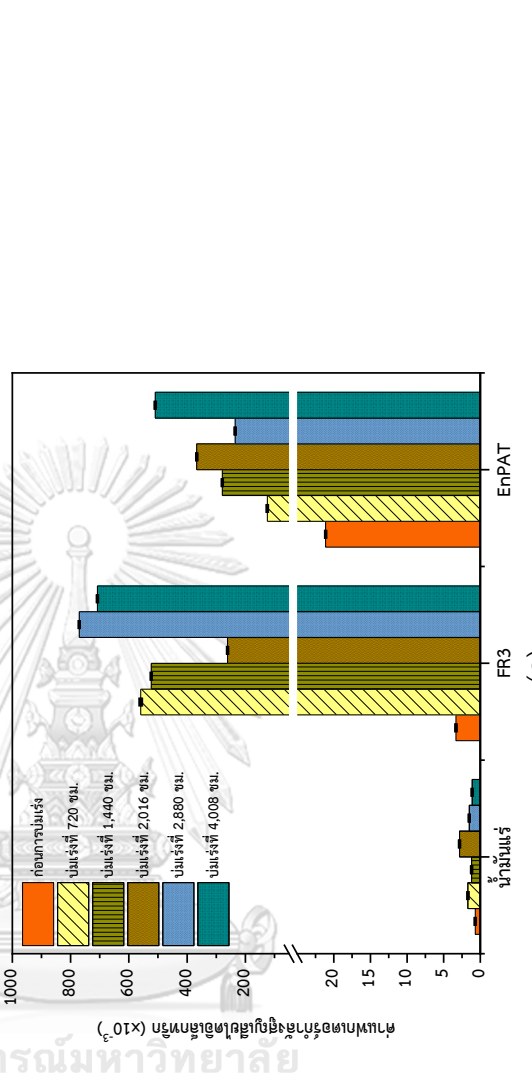
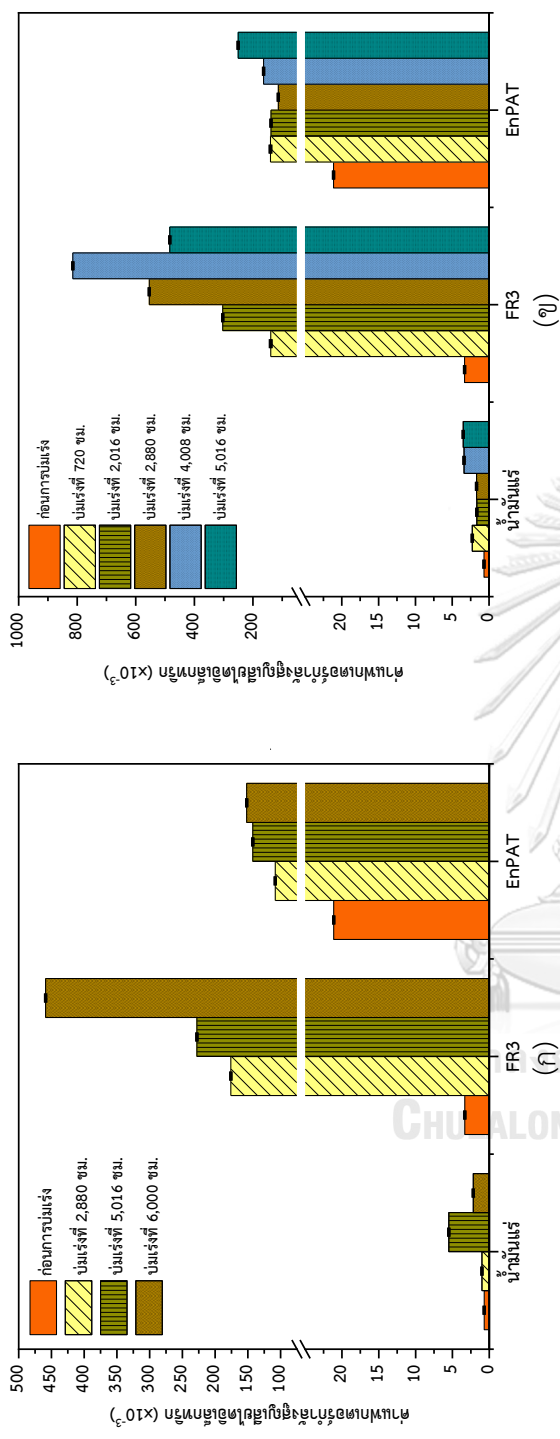
เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของไดอิเล็กทริกในน้ำมัน อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการประเมินคุณภาพของน้ำมันฉนวน หากเกิดการปนเปื้อนของอนุภาคตัวนำไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์ต่างๆเกิดจากการเสื่อมสภาพละลายอยู่ในน้ำมันฉนวนจะเป็นสาเหตุทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลง [5]

##### 4.3.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อน น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติทั้ง FR3 และ EnPAT มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงกว่าน้ำมันแร่ เนื่องจากการปรากฏของกลุ่มมีขั้วจำนวนมากในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติจึงส่งผลทำให้ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าสูง [5] โดยที่ FR3 และ EnPAT มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก  $3.32 \times 10^{-3}$  และ  $21.1 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ ขณะที่น้ำมันแร่มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก  $0.69 \times 10^{-3}$  แต่ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง โดยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 2,880 – 6,000 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันแร่มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง  $1.00 \times 10^{-3}$  -  $5.49 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 1- 8 เท่า) ขณะที่เอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า FR3 มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง  $176 \times 10^{-3}$  -  $459 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 53 – 168 เท่า) และ EnPAT มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง  $108 \times 10^{-3}$  -  $152 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 5 – 7 เท่า) ดังแสดงในรูปที่ 4.15ก ในส่วนของการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 720 – 5,016 ชั่วโมง พบว่าค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันแร่เพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง  $1.67 \times 10^{-3}$  -  $3.51 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 2 – 5 เท่า) ซึ่งยังคงมีค่าน้อยกว่า EnPAT ที่มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง  $113 \times 10^{-3}$  -  $250 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 7 – 12 เท่า) และ FR3 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง  $139 \times 10^{-3}$  -  $816 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 42 – 246 เท่า) ดังแสดงในรูปที่ 4.15ข นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 – 4,008 ชั่วโมง น้ำมันแร่มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดอยู่ระหว่าง  $1.10 \times 10^{-3}$  -  $2.84 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 2 – 4 เท่า) ขณะที่ EnPAT มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง

$124 \times 10^{-3}$  -  $510 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 6 - 24 เท่า) และ FR3 มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง  $523 \times 10^{-3}$  -  $770 \times 10^{-3}$  (เพิ่มขึ้น 79 - 232 เท่า) ดังแสดงในรูปที่ 4.15ค อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิ เป็นระยะเวลาต่างๆ น้ำมันแร่ยังคงมีค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อก่อนการบ่มเร่ง เนื่องจากปริมาณความชื้นและค่าความเป็นกรดที่เกิดขึ้นหลังจากการบ่มเร่งมีค่าเพิ่มสูงไม่มากนัก จึงไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อค่าแพกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริกของน้ำมันแร่ ซึ่งแตกต่างจากใน FR3 และ EnPAT ที่มีค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากอิทธิพลของค่าความเป็นกรดและปริมาณสารจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติเกิดขึ้นมากกว่าหลังจากผ่านการบ่มเร่ง





รูปที่ 4.15 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเร่งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.3.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน น้ำมันทุกชนิดมีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง และยังมีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกมากกว่าน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เนื่องจากค่าความเป็นกรดและปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันทั้ง 3 ชนิดอย่างชัดเจน โดยภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก  $54.2 \times 10^{-3}$ ,  $643.5 \times 10^{-3}$  และ  $422.1 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ ขณะที่ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน น้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT มีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก  $1.69 \times 10^{-3}$ ,  $559.4 \times 10^{-3}$  และ  $124.6 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.11** ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก ( $\times 10^{-3}$ )		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแร่	0.69	1.69	54.2
FR3	3.32	559.4	643.5
EnPAT	21.1	124.6	422.1

### 4.3.3 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า ซึ่งขึ้นกับโครงสร้างภายในของน้ำมันฉนวน หากน้ำมันฉนวนมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มากจะทำให้สามารถเก็บประจุได้มาก โดยพิจารณาจากแวนโธมของสารมีขั้วที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันฉนวน ซึ่งปกติสภาพยอมสัมพัทธ์สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการบ่มเร่งด้วยความร้อน เนื่องจากการปนเปื้อนด้วยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของทั้งกระดาษและน้ำมันฉนวน [5] ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์คำนวณได้จากอัตราส่วนของความจุทางไฟฟ้า (capacitance) ของน้ำมันฉนวนที่บรรจุในเซลล์ทดสอบต่อความจุทางไฟฟ้าอากาศของเซลล์ทดสอบเปล่า [76] ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\varepsilon_x = \frac{C_x}{C_a} \quad (4.1)$$

เมื่อ	$\varepsilon_x$	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันฉนวน
	$C_x$	คือ ความจุไฟฟ้าของน้ำมันฉนวน
	$C_a$	คือ ความจุไฟฟ้าอากาศของเซลล์ทดสอบเปล่า ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 69.73 พิโกฟารัด (pF)

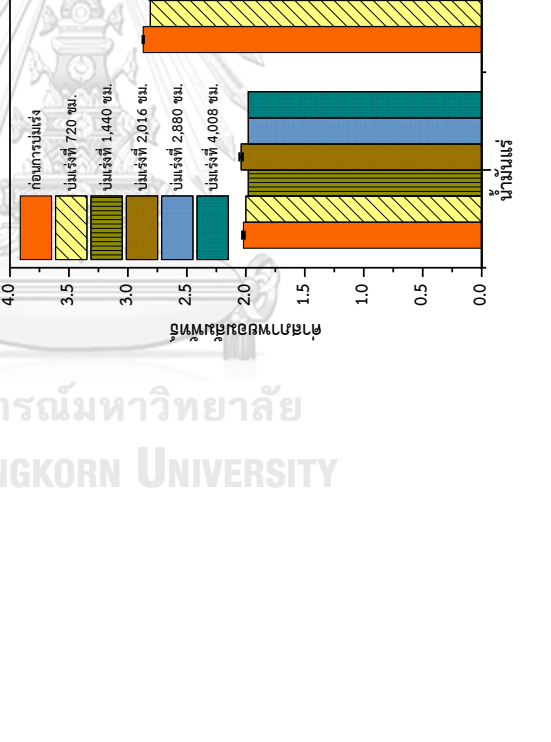
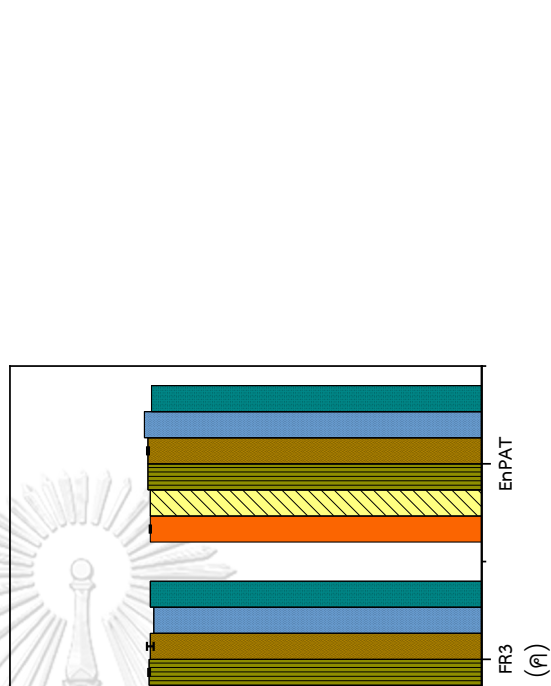
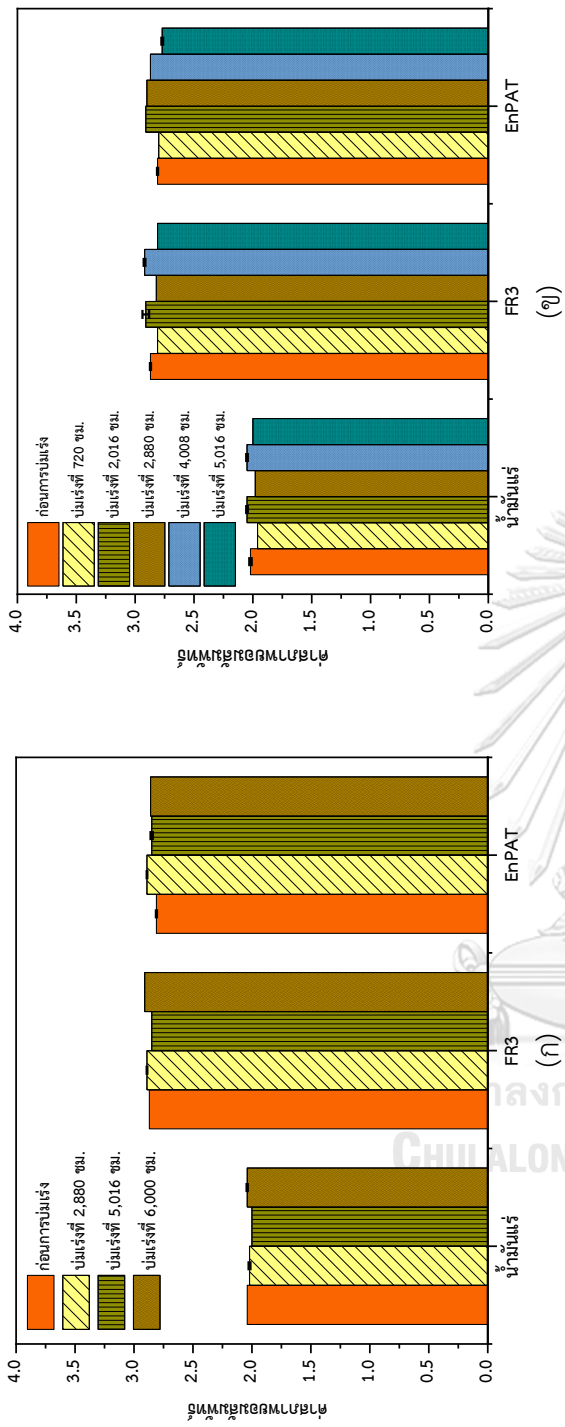
#### 4.3.3.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ซึ่งจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าทั้งก่อนและหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันทุกชนิดยังคงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยน้ำมันแร่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 1.96 – 2.05 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [96] พบว่าปริมาณความชื้นส่งผลกระทบบต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันแร่มาก่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันแร่ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งมีค่าไม่แตกต่างกัน ขณะที่น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติทั้ง FR3 และ EnPAT มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน โดย FR3 มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 2.87 – 2.92 และ EnPAT มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 2.81 – 2.87 อย่างไรก็ตามค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ ทั้ง FR3 และ EnPAT มีค่ามากกว่าน้ำมันแร่ทั้งก่อนและหลังจากผ่านการบ่มเร่ง เนื่องจากน้ำมันแร่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิด

ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มของพาราฟิน แนฟทานิก และแอโรมาติก จึงทำให้กลายเป็นของเหลวที่มีขี้ด่ำซึ่งส่งผลต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จึงมีค่าต่ำ ซึ่งแตกต่างจากน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติที่ประกอบด้วยโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันที่ไม่ใช่เพียงแค่อะตอมของคาร์บอน และอะตอมไฮโดรเจน แต่ยังมีอะตอมของออกซิเจนประกอบด้วย อีกทั้งยังมีปริมาณความชื้นสูง ซึ่งส่งผลทำให้เป็นของเหลวที่มีขี้ด่ำมาก [97] ดังนั้นน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติจึงมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง







รูปที่ 4.16 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันหอมระเหยไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.3.3.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน จะเห็นได้ว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันทุกชนิดมีค่าไม่แตกต่างจากก่อนและหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยน้ำมันแรมมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ 2.04 ขณะที่ FR3 มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ 2.80 และ EnPAT มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ 2.85 ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ดังนั้นการบ่มเร่งเชิงความร้อนไม่ว่าจะเป็นภายใต้บรรยากาศออกซิเจนหรือบรรยากาศไนโตรเจน จึงไม่ได้ส่งผลต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันฉนวนมากนัก

**ตารางที่ 4.12** ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแรม	2.04	2.00	2.04
FR3	2.87	2.81	2.89
EnPAT	2.81	2.81	2.85

#### 4.3.4 ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า

เป็นค่าที่ตรงกันข้ามกับค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ซึ่งบ่งบอกถึงการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage) กับระบบฉนวน [98] ซึ่งในงานด้านหม้อแปลงไฟฟ้าต้องการให้ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันฉนวนมีค่ามาก ซึ่งจะแสดงถึงน้ำมันฉนวนจะมีปริมาณไอออนอิสระน้อย และการปนเปื้อนของตัวนำไฟฟ้ามีปริมาณน้อย [99] นอกจากนี้ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ยังมีความสัมพันธ์กับค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริก เนื่องจากได้ผลกระทบจากสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันฉนวนที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ค่าสภาพความ

ต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าลดลง แต่ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันฉนวนมีสูตรคำนวณ [76] ดังแสดงในสมการที่ 4.2

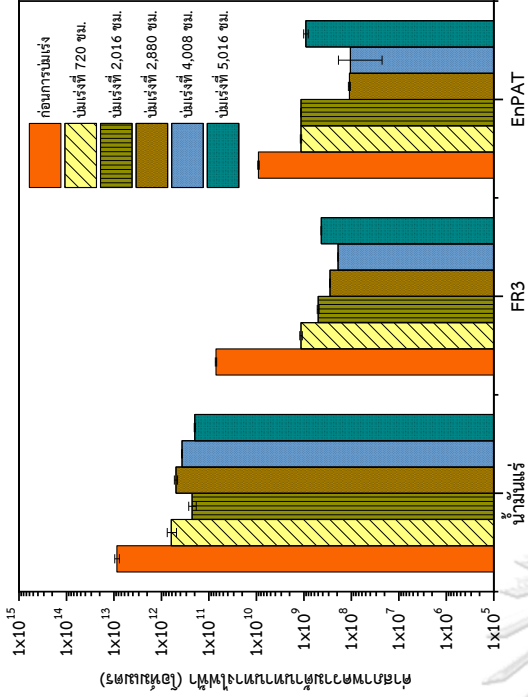
$$\rho = K\left(\frac{U}{I}\right) \quad (4.2)$$

เมื่อ	$\rho$	คือ ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า
	$U$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ในหน่วยโวลต์
	$I$	คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในหน่วยแอมแปร์
	$K$	คือ ค่าคงที่ของเซลล์ทดสอบ ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 7.879 เมตร

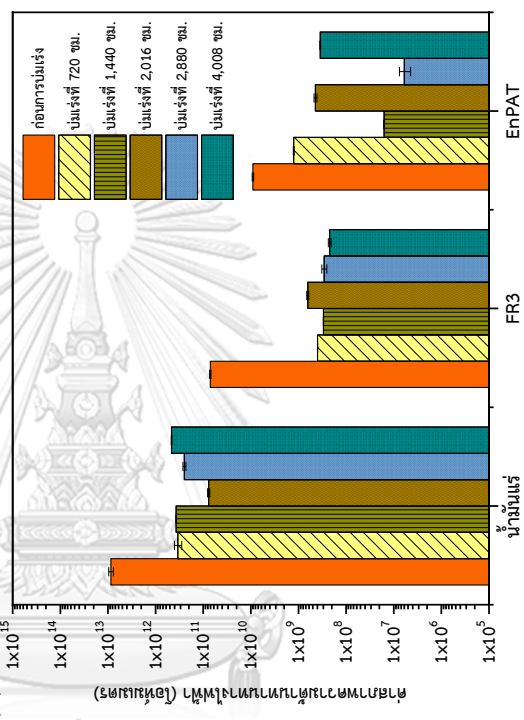
#### 4.3.4.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อนน้ำมันแร่มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้ามากที่สุดที่  $8.65 \times 10^{12}$  โอห์มเมตร รองลงมาคือ FR3 มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า  $7.11 \times 10^{10}$  โอห์มเมตร และ EnPAT มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าน้อยสุดที่  $9.04 \times 10^9$  โอห์มเมตร แต่ภายหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าน้ำมันทุกชนิดมีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าค่อยๆลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน เนื่องจากเกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพในน้ำมันฉนวนที่มีปริมาณมากขึ้นหลังจากผ่านการบ่มเร่ง เช่น ความชื้น กรด สิ่งปนเปื้อนของแข็ง เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะสนับสนุนการนำกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอนส่งผลทำให้น้ำมันฉนวนมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น [100] ขณะที่ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันฉนวนมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการบ่มเร่ง โดยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 2,880 – 6,000 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันแร่ยังคงมีค่าสภาพความต้านทานมากที่สุดอยู่ระหว่าง  $1.50 \times 10^{10}$  –  $4.98 \times 10^{11}$  โอห์มเมตร ขณะที่ FR3 มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $3.48 \times 10^8$  –  $7.10 \times 10^9$  โอห์มเมตร และ EnPAT มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $1.08 \times 10^9$  –  $1.21 \times 10^9$  โอห์มเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17ก ในส่วนของการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 720 – 5,016 ชั่วโมง พบว่าน้ำมันแร่มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้ามากกว่า FR3 และ EnPAT ในทุก

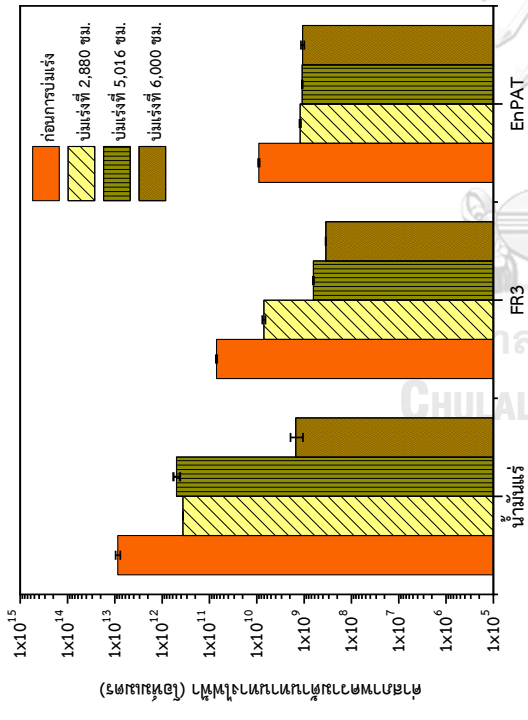
ระยะเวลาการบ่มเร่ง โดยน้ำมันแรมมีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $1.98 \times 10^{11} - 6.19 \times 10^{11}$  โอห์มเมตร ขณะที่ FR3 และ EnPAT มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $1.91 \times 10^8 - 1.15 \times 10^9$  และ  $1.05 \times 10^8 - 1.15 \times 10^9$  โอห์มเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17ข นอกจากนี้การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 - 4,008 ชั่วโมง พบว่าค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันแรมยังคงมีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับ FR3 และ EnPAT โดยน้ำมันแรมมีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $7.69 \times 10^{10} - 4.62 \times 10^{11}$  โอห์มเมตร ขณะที่ FR3 มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $2.21 \times 10^8 - 6.38 \times 10^8$  โอห์มเมตร และ EnPAT มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $6.00 \times 10^6 - 1.26 \times 10^9$  โอห์มเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17ค อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าหลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิ น้ำมันแรมยังคงมีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้ามากกว่าน้ำมันกลุ่มเอสเตอรืธรรมชาติทั้ง FR3 และ EnPAT เนื่องจากปริมาณความชื้นและค่าความเป็นกรดที่เกิดขึ้นในน้ำมันแรมมีค่าน้อยกว่า



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.17 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปนเปื้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด : (ก) 110°C (ข) 130°C และ (ค) 150°C

#### 4.3.4.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากผลการทดลองการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันทุกชนิดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง อีกทั้งยังเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แต่มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยกว่า เนื่องจากผลิตภัณฑ์จำนวนมากที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของทั้งกระดาชนวนและน้ำมัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์กรดต่างๆ ความชื้น และสารประกอบที่เกิดจากการเสื่อมสภาพต่างๆ ด้วยการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีปริมาณมากกว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองกับปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันฉนวนหลังจากผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนมีค่าสูงกว่า ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดเหล่านี้จะเป็นการไปเพิ่มไอออนอิสระทำให้น้ำมันฉนวนเกิดนำไฟฟ้าได้มากขึ้น [101] ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันทุกชนิดจึงมีค่าน้อยกว่า โดยน้ำมันแร่มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า  $6.59 \times 10^9$  โอห์มเมตร ขณะที่ FR3 มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า  $2.44 \times 10^8$  โอห์มเมตร และ EnPAT มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า  $5.06 \times 10^8$  โอห์มเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.15

**ตารางที่ 4.13** ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เทียบบรรยากาศออกซิเจน

ชนิดของน้ำมัน	ค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า (โอห์มเมตร)		
	ก่อนการบ่มเร่ง	ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน
น้ำมันแร่	$8.65 \times 10^{12}$	$3.42 \times 10^{11}$	$6.59 \times 10^9$
FR3	$7.11 \times 10^{10}$	$3.97 \times 10^8$	$2.44 \times 10^8$
EnPAT	$9.04 \times 10^9$	$1.26 \times 10^9$	$5.06 \times 10^8$

## 4.4 การวิเคราะห์สมบัติของกระดาษฉนวนเซลลูโลส

### 4.4.1 การเปลี่ยนแปลงสี

#### 4.4.1.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน













จากตารางที่ 4.16 – 4.24 และ 4.26 - 4.29 จะเห็นได้ว่ากระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ กระดาษฉนวนแต่ละชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง ซึ่งบ่งบอกได้ว่ากระดาษฉนวนนั้นเกิดการเสื่อมสภาพขึ้น เนื่องจากในระหว่างการบ่มเร่งด้วยความร้อน กระดาษฉนวนจะถูกทำลายจากส่วนของความชื้น กรด และสิ่งปนเปื้อนที่เกิดจากการเสื่อมสภาพในน้ำมันที่กระดาษฉนวนจุ่มแช่อยู่ โดยความชื้นและกรดที่เกิดขึ้นจะไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาษฉนวน ซึ่งส่งผลให้กระดาษฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงสี อีกทั้งยังส่งผลทำให้ความแข็งแรงและค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไซนของกระดาษมีค่าลดลง [102, 103] นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน แต่มีระยะเวลาการบ่มเร่งเท่ากัน ดังตัวอย่างเช่น การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110, 130, 150 องศาเซลเซียส นาน 2,880 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.18, 4.23 และ 4.30 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบ่มเร่งดังกล่าว กระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีสีเข้มกว่ากระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส เนื่องจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาษฉนวนเพิ่มเติม นอกเหนือจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้กระดาษฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 110 และ 130 องศาเซลเซียส

#### 4.1.1.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

หลังจากผ่านการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาศนวนแต่ละชนิด โดยกระดาศนวนจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง นอกจากนี้ยังพบว่าภายหลังจากการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน กระดาศนวนแต่ละชนิดมีสีเข้มกว่ากระดาศนวนที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.25 เนื่องจากการบ่มเร่งทั้งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน และภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิเดียวกัน การเสื่อมสภาพของกระดาศนวนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจึงเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เนื่องด้วยการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ปริมาณออกซิเจนที่มีมากกว่าภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จึงเป็นไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระดาศนวนได้มากกว่าภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีปริมาณออกซิเจนน้อย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมา น้ำ และกรดจำนวนมาก ซึ่งน้ำและกรดที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของกระดาศนวนต่อไปอีก ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การเสื่อมสภาพของกระดาศนวนด้วยการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนนี้จึงเกิดขึ้นมากกว่า และกระดาศนวนจึงมีสีเข้มกว่า


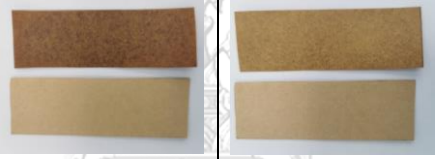

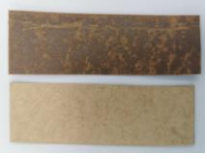







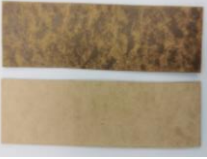


**ตารางที่ 4.14** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				











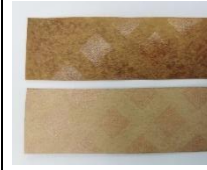
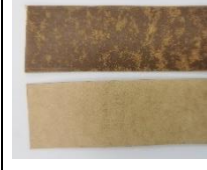
รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.15** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5,016 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				


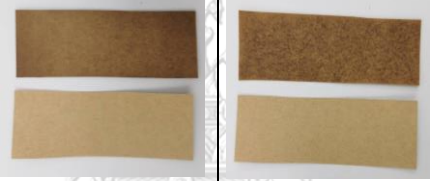




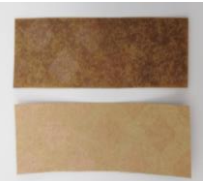





รูปถ่ายเมื่อ : ก่อนการบ่ม และรูปถ่ายเมื่อ : หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5,016 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.16** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6,000 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				













รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6,000 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.17** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				









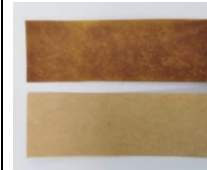

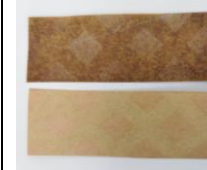

รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.18** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				

รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่มเร่ง และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.19** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				

รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง



**ตารางที่ 4.20** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่ลุ่มแฉะในน้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4,008 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4,008 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				

รูปถ่ายเมื่อ : ก่อนการบ่มเร่ง และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4,008 ชั่วโมง













**ตารางที่ 4.21** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5,016 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5,016 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				

รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5,016 ชั่วโมง



**ตารางที่ 4.22** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				


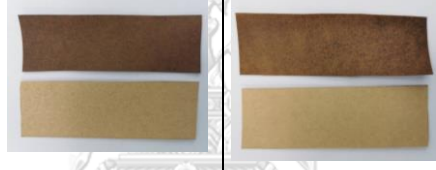










รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.23** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแข็งในน้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิที่จุ่มแข็ง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				













รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่มแข็ง และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มแข็งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.24** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่ลุ่มแฉะในน้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1,440 ชั่วโมง ภายใต้อุปกรณ์ไนโตรเจน

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				




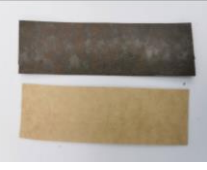








รูปถ่ายเมื่อ : ก่อนการบ่มแฉะ และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มแฉะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1,440 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.25** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				













รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,016 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.26** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				

รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2,880 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.27** การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด ภายหลังจากการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4,008 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิที่จุ่มแช่น้ำมันแต่ละชนิด

ชนิดของน้ำมัน	ชนิดของกระดาษฉนวน			
	ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
น้ำมันแร่				
FR3				
EnPAT				

รูปซ้ายมือ : ก่อนการบ่ม และรูปขวามือ : หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4,008 ชั่วโมง



#### 4.4.2 ค่าความคงทนต่อแรงดึง

เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปการคาดคะเนอายุขัยของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกกำหนดจากค่าความทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนมีค่าลดลงจากการเสื่อมสภาพทางความร้อน [104] ในการทดลองนี้กระดาษฉนวนแต่ละชนิดต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพก่อนการบ่มแรง โดยหลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าว กระดาษฉนวนแต่ละชนิดมีค่าความคงทนต่อแรงดึงแตกต่างกัน โดยกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่า 15.5 กิโลนิวตัน/เมตร กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. มีค่า 19.3 กิโลนิวตัน/เมตร กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์ทอ มีค่า 22.5 กิโลนิวตัน/เมตร และกระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม. มีค่า 57.8 กิโลนิวตัน/เมตร อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์สถานะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนจะบ่งบอกด้วยค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ (retained tensile strength: RTS) ซึ่งมีสูตรคำนวณ[105] ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$RTS = \frac{TS}{ITS} \times 100\% \quad (4.3)$$

เมื่อ  $TS$  คือ ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนหลังผ่านการบ่มแรง  
(กิโลนิวตัน/เมตร)

$ITS$  คือ ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนก่อนการบ่มแรง  
(กิโลนิวตัน/เมตร)

โดยกำหนดให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพมีค่าเป็น 100% ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นก่อนการบ่มแรงด้วยความร้อน

#### 4.4.2.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในทุกชนิดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนเป็นระยะเวลานาน ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายของกระดาษฉนวน โดยปฏิกิริยานี้จะทำลายผิวภายนอกของกระดาษฉนวน และทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่เซลลูโลส [103] จึงทำให้กระดาษฉนวนมีความเปราะบาง เกิดการฉีกขาดง่าย และสูญเสียสมบัติความแข็งแรงไป โดยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 2,880 – 6,000 ชั่วโมง พบว่าค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดมีค่าค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น และเมื่อสิ้นสุดการบ่มเร่งค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันทุกชนิดยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.30 ในส่วนของการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 720 – 5,016 ชั่วโมง พบว่าค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แต่ความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันทุกชนิดมีค่าน้อยกว่าที่ระยะเวลาการบ่มเร่งเท่ากัน ได้แก่ 2,880 และ 5,016 ชั่วโมง และเมื่อสิ้นสุดการบ่มเร่งค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันทุกชนิดยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.31 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบ่มเร่งของทั้งอุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนทุกชนิดยังคงมีค่ามากกว่าค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ 50% ตาม IEEE Std.C57.91-2011 กำหนด ซึ่งบ่งบอกได้ว่ากระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันทั้ง 3 ชนิดเกิดการเสื่อมสภาพยังไม่แตกต่างกันมากนัก ขณะที่การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 – 4,008 ชั่วโมง พบว่าค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันทุกชนิดมีค่าลดลงอย่างมาก ตั้งแต่ระยะเวลาเวลาบ่มเร่งผ่านไป 720 ชั่วโมง อีกทั้งยังมีค่าน้อยกว่าการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาเท่ากันอย่างเห็นชัดเจน ได้แก่ 720, 2,016, 2,880 และ 4,008 ชั่วโมง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเร่งสูงกว่ายิ่งไปเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ซึ่งทำให้เกิดการแตกออกของพันธะไกลซิดิกมาก ดังนั้นจึงส่งผลทำให้กระดาษ



ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพมากกว่า อีกทั้งน้ำที่เกิดขึ้นจำนวนมากที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา ดังกล่าวจะยิ่งไปเร่งการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อไป นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมัน ทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 2,880 และ 4,008 ชั่วโมง โดยกระดาษฉนวนทั้ง 4 ชนิดที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT มีความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือมากกว่ากระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่ โดยกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT มีความคงทนต่อแรงดึงของเหลือของกระดาษฉนวนทั้ง 4 ชนิด มีค่าอยู่ระหว่าง 38 – 50% ขณะที่กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่มีความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือน้อยกว่า 17% ดังแสดงในตารางที่ 4.32 จึงสามารถบ่งบอกได้ว่ากระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ FR3 และ EnPAT จะชะลอการเสื่อมสภาพได้ดีกว่ากระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่ เนื่องจากน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติมีขี้ผึ้งมาก และมีระดับความอึดตัวด้วยน้ำที่สูงกว่า น้ำมันแร่ถึง 3 – 4 เท่า [103]

**ตารางที่ 4.28** ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษขนาดหน้าตัดที่จุ่มแม่ขึ้นน้ำมันแต่ละชนิดที่จุ่มก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ระยะเวลาในการบ่มแรง	ชนิดของน้ำมัน	ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษขนาดหน้าตัด (กิโลนิวตัน/เมตร)				
		ชนิดของกระดาษขนาดหน้า				
		ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไปดเมอนคอต	ความหนา 0.5 มม.	
ก่อนการบ่มแรง	-	15.5	19.3	22.5	57.8	
	น้ำมันแร่	11.64 (75.10)*	16.04 (83.11)	19.20 (85.33)	49.20 (85.12)	
2,880 ชม.	FR3	12.56 (81.03)	15.36 (79.59)	18.60 (82.67)	48.50 (83.91)	
	EnPAT	12.12 (78.19)	15.36 (79.59)	18.16 (80.71)	43.20 (74.74)	
5,016 ชม.	น้ำมันแร่	11.44 (73.81)	15.80 (81.87)	19.04 (84.62)	47.60 (82.35)	
	FR3	11.76 (75.87)	15.28 (79.17)	18.28 (81.24)	41.90 (72.49)	
	EnPAT	12.08 (77.94)	15.32 (79.38)	18.12 (80.53)	43.10 (74.57)	
6,000 ชม.	น้ำมันแร่	11.36 (73.29)	15.60 (80.83)	19.08 (84.80)	47.40 (82.01)	
	FR3	11.64 (75.10)	15.24 (78.96)	18.16 (80.71)	41.60 (71.97)	
	EnPAT	11.88 (76.65)	15.08 (78.13)	17.24 (76.62)	41.80 (72.32)	

\* เปอร์เซนต์ค่าคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ

**ตารางที่ 4.29** ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษชนิดที่จุ่มแม่ขึ้นน้ำมันแต่ละชนิดที่จุ่มก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ระยะเวลาในการบ่มเร่ง	ชนิดของน้ำมัน	ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษชนิดจุ่ม (กิโลนิวตัน/เมตร)					
		ชนิดของกระดาษชนิดจุ่ม					
		ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.		
ก่อนการบ่มเร่ง	-	15.5	19.3	22.5	57.8		
	น้ำมันแร่	11.96 (77.14)	14.55 (75.37)	17.67 (78.52)	45.40 (78.55)		
	FR3	10.77 (76.48)	15.10 (76.76)	17.24 (76.64)	39.70 (68.69)		
720 ชม.	EnPAT	11.65 (75.14)	14.65 (75.85)	16.94 (75.61)	41.30 (71.45)		
	น้ำมันแร่	11.00 (70.97)	14.08 (72.95)	16.20 (72.00)	42.00 (72.66)		
	FR3	11.08 (71.48)	14.60 (75.65)	16.44 (73.07)	38.00 (65.74)		
2,016 ชม.	EnPAT	10.96 (70.71)	14.40 (74.61)	17.44 (75.11)	40.20 (69.55)		
	น้ำมันแร่	10.36 (66.84)	13.72 (71.09)	15.24 (67.73)	39.63 (68.56)		
	FR3	11.08 (71.48)	13.88 (73.48)	16.40 (72.89)	36.97 (63.96)		
2,880 ชม.	EnPAT	10.44 (70.19)	13.88 (73.48)	15.20 (71.47)	38.70 (67.50)		
	น้ำมันแร่	10.12 (65.29)	13.20 (70.05)	14.92 (66.31)	39.50 (68.34)		
	FR3	10.88 (70.19)	13.72 (71.09)	16.32 (72.53)	36.50 (63.05)		
4,008 ชม.	EnPAT	10.33 (68.69)	13.56 (70.26)	15.10 (70.12)	38.69 (66.93)		
	น้ำมันแร่	10.01 (64.77)	12.50 (64.87)	14.72 (65.42)	39.30 (67.99)		
	FR3	10.96 (70.71)	13.40 (70.47)	16.16 (71.82)	36.10 (62.46)		
5,016 ชม.	EnPAT	10.28 (66.32)	11.69 (60.73)	15.01 (69.58)	38.05 (65.02)		

\* เปรอริ์ใช้ชนิดค่าคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ

**ตารางที่ 4.30** ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษขนาดและชนิดที่จุ่มแม่ขึ้นน้ำมันแต่ละชนิดที่จุ่มก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ระยะเวลาในการบ่มเร่ง	ชนิดของน้ำมัน	ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษขนาด (กิโลนิวตัน/เมตร)					
		ชนิดของกระดาษขนาด					
		ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.		
ก่อนการบ่มเร่ง	-	15.5	19.3	22.5	57.8		
	น้ำมันแร่	8.64 (55.74)	12.92 (66.94)	14.60 (64.98)	39.20 (67.82)		
720 ชม.	FR3	10.44 (67.35)	13.20 (68.39)	15.88 (70.58)	34.40 (59.52)		
	EnPAT	8.96 (57.81)	11.36 (58.86)	13.40 (59.56)	29.50 (51.04)		
1,440 ชม.	น้ำมันแร่	7.22 (49.81)	9.60 (49.74)	11.32 (50.31)	30.80 (53.29)		
	FR3	9.56 (61.68)	12.04 (62.38)	13.80 (61.33)	34.20 (59.17)		
	EnPAT	8.60 (55.48)	10.24 (53.06)	11.88 (52.80)	28.00 (48.44)		
	น้ำมันแร่	6.92 (44.65)	8.60 (44.56)	9.40 (41.78)	26.80 (46.37)		
2,016 ชม.	FR3	8.64 (55.74)	10.52 (54.51)	12.80 (56.89)	30.23 (51.02)		
	EnPAT	7.84 (50.58)	9.92 (51.40)	11.76 (52.27)	27.98 (48.27)		
2,880 ชม.	น้ำมันแร่	1.60 (10.32)	2.32 (12.02)	2.84 (12.62)	9.80 (16.69)		
	FR3	7.22 (49.81)	9.92 (51.40)	11.24 (49.96)	24.80 (42.91)		
	EnPAT	7.24 (46.71)	9.16 (47.46)	10.16 (45.16)	25.00 (43.25)		
	น้ำมันแร่	1.28 (8.26)	2.04 (10.57)	1.40 (6.22)	5.60 (9.69)		
4,008 ชม.	FR3	6.72 (43.25)	6.16 (31.92)	8.60 (38.22)	22.40 (38.75)		
	EnPAT	6.28 (40.52)	9.40 (48.70)	9.44 (41.96)	24.50 (40.94)		

\* เปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดึงคงที่เหลือ

#### 4.4.2.2 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากผลการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าค่าความคงทนต่อแรงของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันทุกชนิดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง และค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดหลังจากผ่านบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน มีค่าน้อยกว่ากระดาษฉนวนที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เนื่องจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันเกิดการเสื่อมสภาพมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาไพโรไลซิสเป็นหลัก แต่การเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากปริมาณออกซิเจนมีน้อย ซึ่งแตกต่างจากการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่มีปริมาณออกซิเจนสูง จึงส่งผลทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระดาษฉนวนมากขึ้น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนอกเหนือจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เกิดขึ้น เช่นเดียวกับการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังนั้นการเกิดขึ้นของทั้ง 3 ปฏิกิริยาในระหว่างการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน จึงส่งผลทำให้กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันทุกชนิดเกิดการเสื่อมสภาพมากกว่า อีกทั้งยังทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดมีค่าน้อยกว่า โดยกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ 43 – 67% กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. มีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ 50 – 61% กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์ทอ มีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ 43 – 63% และกระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม. มีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ 48 – 55% ดังแสดงในตารางที่ 4.33

**ตารางที่ 4.31** ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษขนาดหน้าตัดที่จุ่มแช่ในน้ำมันแต่ละชนิดที่จุ่มก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเทียบกับบรรยากาศออกซิเจน

ภายใต้บรรยากาศ	ชนิดของน้ำมัน	ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษขนาดหน้าตัด (กิโลนิวตัน/เมตร)				
		ชนิดของกระดาษขนาดหน้า				
		ความหนา 0.13 มม.	ความหนา 0.18 มม.	ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์คอต	ความหนา 0.5 มม.	
ก่อนการบ่มเร่ง	-	15.5	19.3	22.5	57.8	
	น้ำมันแร่	8.64 (55.74)	12.92 (66.94)	14.60 (64.98)	39.20 (67.82)	
	FR3	10.44 (67.35)	13.20 (68.39)	15.88 (70.58)	34.40 (59.52)	
บรรยากาศไนโตรเจน	EnPAT	8.96 (57.81)	11.36 (58.86)	13.40 (59.56)	29.50 (51.04)	
	น้ำมันแร่	6.72 (43.35)	10.96 (56.79)	9.76 (43.38)	31.60 (54.67)	
	FR3	10.32 (66.58)	12.20 (60.39)	14.08 (62.58)	28.00 (48.44)	
บรรยากาศออกซิเจน	EnPAT	8.88 (54.29)	10.70 (50.10)	10.00 (44.44)	28.40 (49.13)	

\* เบอร์เซ็นต์ค่าคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ

#### 4.4.3 ค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน

##### 4.4.3.1 ระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อน ค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของกระดาษฉนวนจะมีค่ามาก เนื่องจากกระดาษฉนวนใหม่จะประกอบไปด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่มีความหนาแน่น และยาว โดยกระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์ทอ มีค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน 976 และกระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม. มีค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน 1,086 แต่หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ พบว่าค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของกระดาษฉนวนทั้ง 2 ชนิด จะมีค่าค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในระหว่างการบ่มเร่งด้วยความร้อน กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งถูกเร่งด้วยน้ำที่อยู่ภายในน้ำมันฉนวน ซึ่งส่งผลทำให้พันธะระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสแตกออก ดังนั้นค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของกระดาษฉนวนจึงลดลง อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 2,880 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 720 – 2,880 ชั่วโมง พบว่ากระดาษฉนวนทั้ง 2 ชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันแต่ละชนิด มีค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.34 ขณะที่การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2,016 – 2,880 ชั่วโมง พบว่าค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของกระดาษฉนวนทั้ง 2 ชนิดมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.36 เนื่องจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิสูงนี้จะไปทำลายโครงสร้างของกระดาษฉนวนโดยทำให้พันธะไกลโคซิดิกที่มีความอ่อนแอซึ่งเชื่อมอยู่ระหว่างสายโซ่เซลลูโลสถูกตัดขาดได้ง่าย [27] อย่างไรก็ตามกระดาษฉนวนทั้ง 2 ชนิดที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT ยังคงมีค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันมากกว่าที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่

**ตารางที่ 4.32** ค่าระดับการเกิดพอลิเอไมด์เรซินของกระดาษขนาดชนวนที่จุดแม่พิมพ์ในน้ำมันแต่ละชนิดที่ก่อก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

อุณหภูมิการบ่มแรง (°ซ)	ระยะเวลาในการบ่มแรง	ชนิดของน้ำมัน	ค่าระดับการเกิดพอลิเอไมด์เรซินของกระดาษขนาดชนวน	
			ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	ความหนา 0.5 มม.
-	ก่อนการบ่มแรง	-	976	1,086
110	นาน 2,880 ชม.	น้ำมันแร่	744	809
		FR3	850	809
		EnPAT	840	788
		น้ำมันแร่	679	776
130	นาน 720 ชม.	FR3	756	669
		EnPAT	701	734
		น้ำมันแร่	583	492
		FR3	627	578
150	นาน 2,016 ชม.	EnPAT	593	631
		น้ำมันแร่	529	543
		FR3	642	573
		EnPAT	627	573
150	นาน 2,880 ชม.	น้ำมันแร่	281	286
		FR3	425	367
		EnPAT	420	356
		น้ำมันแร่	162	150
150	นาน 2,880 ชม.	FR3	377	367
		EnPAT	394	356



#### 4.5 ลักษณะการเสื่อมสภาพและกลไกการปกป้องกระตาศนวนที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวน

จากที่กล่าวไปในข้างต้นพบว่า การบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2,880 และ 4,008 ชั่วโมง ในระบบปิด ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน สามารถเห็นถึงความแตกต่างของค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระตาศนวนทั้ง 4 ชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวนที่มีค่าน้อยกว่ากระตาศนวนที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT อย่างมาก และหากสังเกตถึงการเสื่อมสภาพของกระตาศนวนแต่ละชนิด พบว่ากระตาศนวนมีลักษณะการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 2,880 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่ากระตาศนวนทั้ง 4 ชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวนสีเข้มมาก มีความเปราะบาง เกิดรอยแตกและรอยฉีกขาดบนผิวของกระตาศนวน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระตาศนวนที่มีค่าเพียง 10 – 16% ขณะที่กระตาศนวนที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT พบว่ากระตาศนวนทั้ง 4 ชนิดมีสีอ่อนกว่าที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวน และยังไม่พบรอยแตกหรือเกิดรอยฉีกขาดบนผิวของกระตาศนวน เนื่องจากกระตาศนวนแต่ละชนิดยังคงมีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือมากกว่า 40% ขึ้นไป นอกจากนี้การบ่มเร่งที่ระยะเวลา 4,008 ชั่วโมง พบว่ากระตาศนวนที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง โดยมีลักษณะฉีกขาดแยกออกจากกันไม่เป็นแผ่นกระตาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งสอดคล้องกับค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระตาศนวนที่มีค่าน้อยกว่า 10% ขณะที่กระตาศนวนที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT ยังคงมีลักษณะการเสื่อมสภาพเช่นเดียวกับที่ระยะเวลาการบ่มเร่ง 2,880 ชั่วโมง คือ กระตาศนวนยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นไม่พบรอยฉีกขาดหรือรอยแตกบนผิวของกระตาศนวน เนื่องจากค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระตาศนวนแต่ละชนิดยังคงมีค่ามากกว่า 30% ขึ้นไป ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติทั้ง FR3 และ EnPAT สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของกระตาศนวนที่จุ่มแช่ ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [37, 64, 106, 107] พบว่า ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน กระตาศนวนที่จุ่มแช่น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติจะเกิดการเสื่อมสภาพช้ากว่ากระตาศนวนที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวน ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการปกป้องกระตาศนวนของน้ำมันกลุ่ม เอสเทอร์ธรรมชาติ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กลไกการจับน้ำ (water scavenging) ซึ่งกลไกนี้จะแบ่งออกได้เป็น 2 ทาง ได้แก่

1.1 น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ซึ่ง

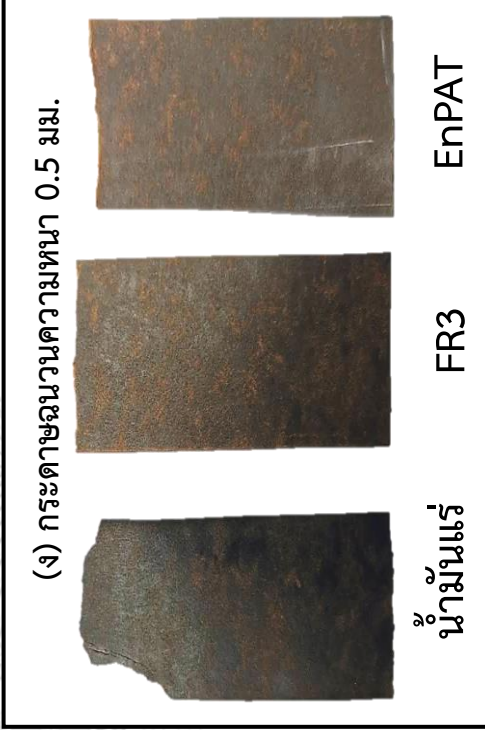
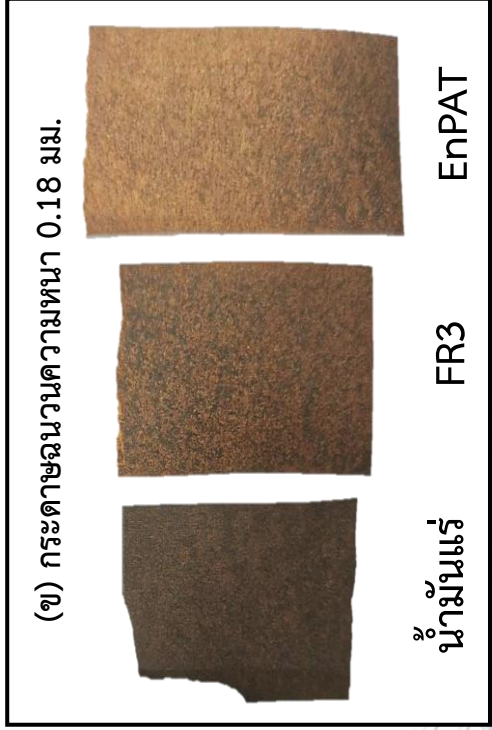
จะใช้น้ำที่ถูกปลดปล่อยมาจากกระตาศนวน [106] ดังนั้นจึงส่งผลทำให้กระตาศนวน

ยังคงแห้งและลดศักยภาพการทำลายกระดาษฉนวนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งจะต้องใช้น้ำในการเกิดปฏิกิริยา

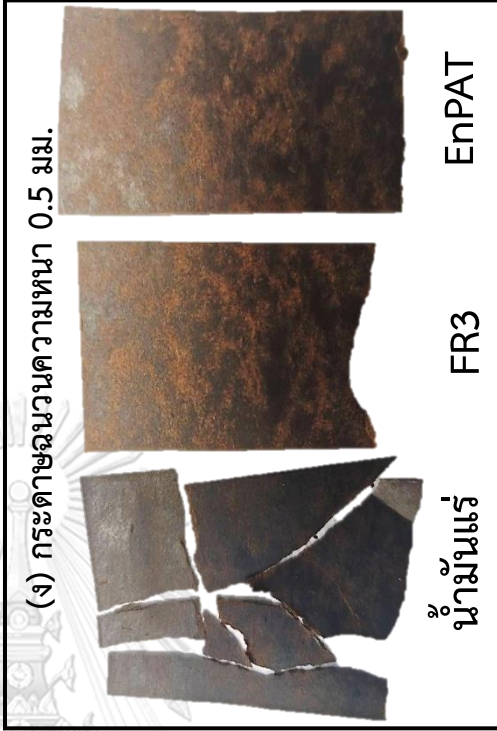
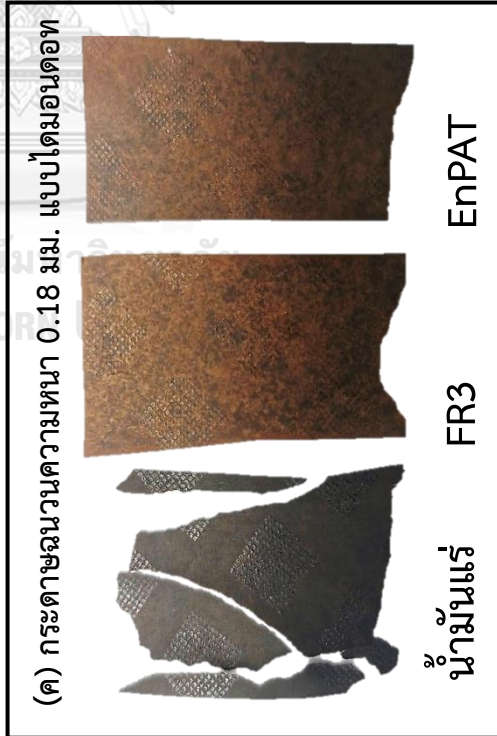
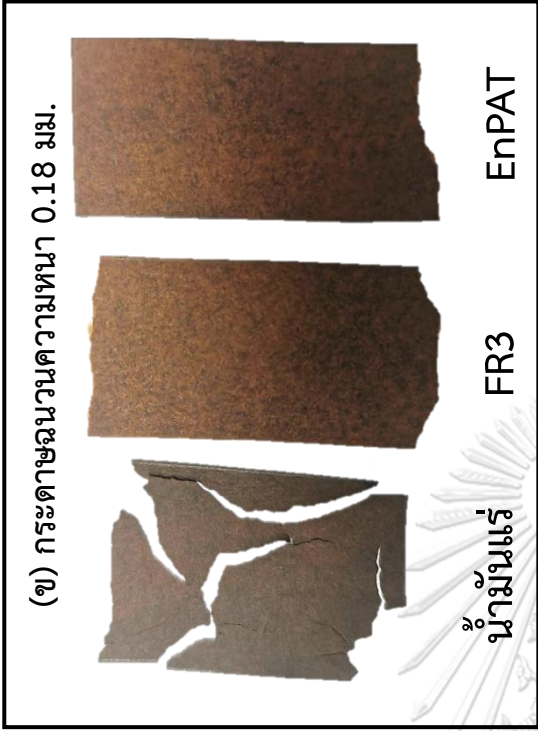
1.2 น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติมีความสามารถในรับน้ำได้มากกว่าน้ำมันแร่ โดยระดับการอิมิต์ด้วยน้ำของน้ำมันฉนวน ที่อุณหภูมิ 0 – 100 องศาเซลเซียส พบว่าระดับการอิมิต์ด้วยน้ำของน้ำมันแร่มีค่าเพียง 10 – 500 มิลลิกรัม/ลิตร ขณะที่น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติมีค่า 1,000 -10,000 มิลลิกรัม/ลิตร ดังตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิห้องระดับการอิมิต์ด้วยน้ำของน้ำมันแร่มีค่า 60 มิลลิกรัม/ลิตร ขณะที่น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติมีระดับการอิมิต์ด้วยน้ำ 1,050 มิลลิกรัม/ลิตร [107] ด้วยความแตกต่างของระดับการอิมิต์ด้วยน้ำนี้ ดังนั้นในระหว่างการบ่มเร่ง อัตราการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติจึงลดลง เนื่องจากน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติสามารถรับน้ำที่มาจากกระดาษฉนวนได้มากกว่าน้ำมันแร่

## 2. กลไกป้องกันการเกิดไฮโดรไลติก (hydrolytic protection)

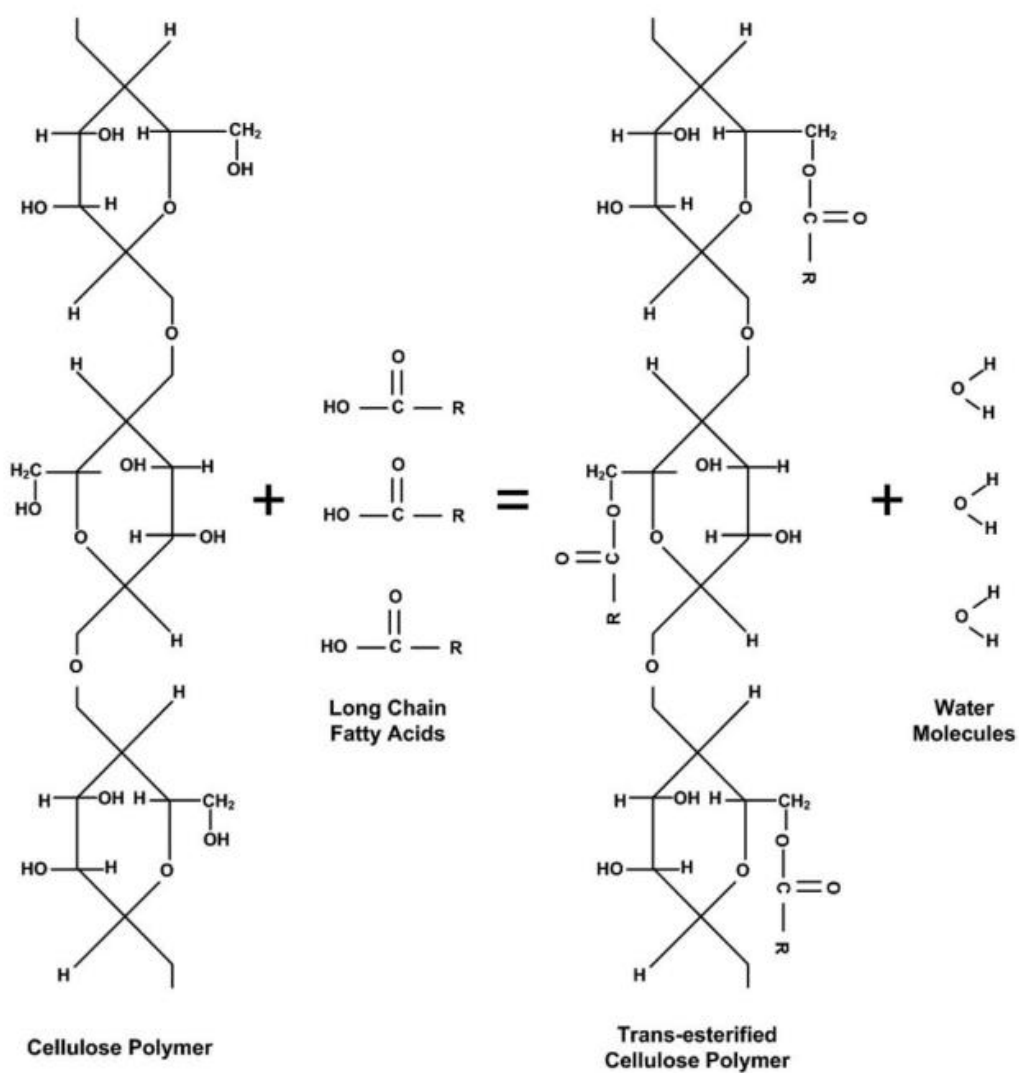
น้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติสามารถแทรกแซงการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในระหว่างการบ่มเร่งด้วยความร้อน โดยกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติจะเข้าไปทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของกระดาษฉนวนผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) โดยกรดไขมันอิสระประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ (-COOR) ที่มีหมู่แอลคิลเป็นอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อกันเป็นสายโซ่ยาว [27] ซึ่งเข้าไปแทนหมู่ (-OH) ในโมเลกุลเซลลูโลส ทำให้เกิดความเกะกะ (steric hindrance) ภายในโครงสร้าง และมีการจัดเรียงตัวไปตามแนวขนานของสายโซ่เซลลูโลส ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จึงเปรียบเสมือนเกิดเป็นเกาะป้องกันน้ำที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยา [27, 108] ซึ่งส่งผลทำให้ลดศักยภาพการทำลายของน้ำและลดอัตราเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนลง



รูปที่ 4.18 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันแต่ละชนิดที่อุณหภูมิการม้วน 150 องศาเซลเซียส นาน 2,880 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน : (ก) กระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. (ข) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. (ค) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์ทอ และ (ง) กระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม



รูปที่ 4.19 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่ชุ่มน้ำในน้ำมันแต่ละชนิดที่อุณหภูมิการต้มแรง 150 องศาเซลเซียส นาน 4,008 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน : (ก) กระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. (ข) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. (ค) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบเติมเนื้อ และ (ง) กระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม.



รูปที่ 4.20 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของกระดาษถนอม [108]

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลการเปรียบเทียบลักษณะการเสื่อมสภาพของน้ำมันแร่ เอสเตอร์ธรรมชาติ เซิงการค่า FR3 และน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม EnPAT ด้วยการบ่มเร่งเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาแตกต่างกัน ได้แก่ 720, 1,440, 2,016, 2,880, 4,008, 5,016 และ 6,000 ชั่วโมง ในระบบปิดภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและบรรยากาศออกซิเจน โดยการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังศึกษาผลการเสื่อมสภาพของ กระจาดษณนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันแต่ละชนิดภายหลังจากการบ่มเร่งเชิงความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

##### 5.1.1 พารามิเตอร์หลักที่ควรพิจารณาสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพ พารามิเตอร์แรกที่ต้องพิจารณาคือ ค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ และค่าการเกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซีของกระจาดษณนวน ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพของกระจาดษณนวน เนื่องจากกระจาดษณนวน เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นแล้วจะไม่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ จะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าสั้นลง

นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาต่อมา คือ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของ น้ำมันฉนวน โดยบอกให้ทราบถึงมีการปนเปื้อนเกิดขึ้นในน้ำมันฉนวน ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติ ความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าของน้ำมันลดลง

ดังนั้นหากกระจาดษณนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันฉนวนชนิดใดก็ตาม ที่ค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ และค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซียังคงมีค่ามาก และค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันฉนวนยังคงมีค่ามากเช่นเดียวกัน ซึ่งจะสามารถบ่งบอกได้ว่าน้ำมันฉนวนชนิดนั้นมีประสิทธิภาพสูง ช่วยให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

##### 5.1.2 ลักษณะการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ น้ำมันทั้ง 3 ชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเข้มขึ้น ซึ่งบ่งบอกได้ว่าน้ำมันฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพขึ้น โดยพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันฉนวนที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นใน น้ำมันแร่มีค่าน้อยกว่าใน FR3 และ EnPAT นอกจากนี้บางช่วงของระยะเวลาการบ่มเร่ง



ปริมาณความชื้นใน FR3 และ EnPAT มีค่าลดลง เนื่องจากน้ำมันทั้ง 2 ชนิดเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในระหว่างการบ่มเร่งและได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นกรดไขมัน ดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขององค์ประกอบกรดไขมันชนิดต่างๆด้วยเทคนิค GC-FID ที่พบว่าปริมาณกรดไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์มีค่าลดลง ขณะที่ปริมาณกรดไขมันชนิดมอนอกลิเซอไรด์ ชนิดไดกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายใน EnPAT เกิดขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ และ FR3 อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นปริมาณขึ้น ค่าความเป็นกรด และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพล้วนส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันฉนวน ซึ่งทำให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าและค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าลดลง ขณะที่ค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ โดย FR3 และ EnPAT ยังคงมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่าน้ำมันแร่ แต่ในทางกลับกันน้ำมันแร่มีค่าแพกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กทริกน้อยที่สุดและค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้ามากที่สุด อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าแรงดึงผิวของน้ำมันแร่และ FR3 มีค่าลดลง ขณะที่ EnPAT มีค่าแรงดึงผิวมีค่าคงที่ นอกจากนี้ปริมาณสารประกอบฟูแรนที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนใน FR3 และ EnPAT เกิดขึ้นน้อยกว่าในน้ำมันแร่อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามค่าความหนืดของน้ำมันทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของแต่ละอุณหภูมิการบ่มเร่ง

### 5.1.3 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

กระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่ในน้ำมันทุกชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเข้มขึ้น หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ซึ่งบ่งบอกได้ว่ากระดาษฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพขึ้น โดยสอดคล้องกับค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ และค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซีของกระดาษฉนวนมีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 110 และ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างๆ กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันทั้ง 3 ชนิดมีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือไม่แตกต่างกันมากนัก โดยยังมีค่ามากกว่า 60% ขึ้นไป อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิการบ่มเร่ง 150 องศาเซลเซียส นาน 2,880 และ 4,008

ชั่วโมง จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือ และค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์เซชันของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่มีค่าน้อยกว่าที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT อย่างชัดเจน อีกทั้งลักษณะทางกายภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่มีสีน้ำตาลเข้มมาก มีความเปราะ และเกิดการฉีกขาดแยกออกจากกัน ขณะที่กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ใน FR3 และ EnPAT ไม่พบลักษณะความเสียหายดังกล่าว และมีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือและค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์เซชันของกระดาษฉนวนไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถบ่งบอกได้ว่าการบ่มเร่งที่อุณหภูมิสูง กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่ใน EnPAT และ FR3 จะเกิดการเสื่อมสภาพช้ากว่าที่จุ่มแช่ในน้ำมันแร่

#### 5.1.4 ลักษณะการเสื่อมสภาพของน้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

ภายหลังจากการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง น้ำมันทุกชนิดมีสีเข้มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยน้ำมันแร่มีค่าสีมากที่สุด รองลงมาคือ EnPAT และ FR3 มีค่าสีน้อยที่สุด อีกทั้งปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด ค่าความหนืดที่เกิดขึ้น และปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับน้ำมันที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แต่จะมีค่ามากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเป็นกรดและปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายในน้ำมันฉนวนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสามารถบ่งบอกได้ว่าน้ำมันทั้ง 3 ชนิดเกิดการเสื่อมสภาพรุนแรงกว่าจากการถูกเร่งด้วยปริมาณแก๊สออกซิเจนจำนวนมาก อย่างไรก็ตามน้ำมันแร่ยังคงมีค่าความเป็นกรดน้อยกว่าใน FR3 และ EnPAT โดยการเพิ่มขึ้นที่มากกว่าของค่าความเป็นกรดของ FR3 และ EnPAT ที่บ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนจะสอดคล้องกับผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นมากกว่าที่ผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แต่น้ำมันแร่มีปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายอยู่มากที่สุด รองลงมาคือ FR3 ขณะที่ EnPAT มีปริมาณสารที่เกิดจากการเสื่อมสภาพละลายอยู่น้อยที่สุด นอกจากนี้หลังจากผ่านการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจน สมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันทั้ง 3 ชนิดแสดงแนวโน้มที่แย่กว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ยกเว้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ไม่แตกต่างกัน โดย EnPAT ยังคงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่าน้ำมันแร่และ FR3 ถึงแม้ว่า EnPAT จะมีค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงกว่าและค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยกว่าน้ำมันแร่



อย่างไรก็ตามการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนทำให้น้ำมันทั้ง 3 ชนิดเกิดการเสื่อมสภาพมากกว่าภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

### 5.1.5 ลักษณะการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันฉนวนภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

กระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่จุ่มแช่น้ำมันแร่ FR3 และ EnPAT หลังจากผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 720 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน กระดาษฉนวนมีสีเข้มกว่าที่ผ่านการบ่มภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือน้อยกว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศออกซิเจนทำให้กระดาษฉนวนที่จุ่มแช่น้ำมันเกิดการเสื่อมสภาพได้มากกว่าการบ่มเร่งภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเร่งความร้อนให้มีความเหมาะสม เพื่อให้กระดาษฉนวนมีค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือเข้าใกล้หรือน้อยกว่า 50% ซึ่งเป็นว่าถึงอายุสิ้นสุดของกระดาษฉนวน เพื่อใช้ในการคำนวณหาอายุขัยของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ศึกษาผลกระทบของสารประกอบกลุ่มแคโรทีนอยด์ในน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันฉนวน
3. ศึกษาจำนวนพันธะคูในเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ด้วยการวัดค่าไอโอดีน (iodine value) ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วทำให้ปริมาณความชื้นในน้ำมันฉนวนมีค่าแตกต่างกัน

## บรรณานุกรม

1. Saha, T.K. and P. Purkait, Transformer insulation materials and ageing. Wiley-IEEE Press, 2017(1): p. 1-34.
2. Tayebi, H.R., A. Gholami, and M. Mirzaie, Insulation Condition Assessment of Power Transformers Using Accelerated Ageing Tests. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2009.
3. Sari, Y.E., et al., Chemical and Physical Performance of Kraft Paper Immersed in Natural Ester from Palm Oil Under Accelerated Thermal Aging. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 2019. 11(2): p. 408-426.
4. Rafiq, M., et al., Use of vegetable oils as transformer oils – a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 52: p. 308-324.
5. Singha, S., et al., Comparative aging characteristics between a high oleic natural ester dielectric liquid and mineral oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014. 21(1): p. 149-158.
6. Danikas, M. and R. Sarathi, Alternative Fluids—with a Particular Emphasis on Vegetable Oils—as Replacements of Transformer Oil: A Concise Review. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2020. 10(6): p. 6570-6577.
7. Liao, R., et al., A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011. 18(5): p. 1626-1637.
8. Cumroon, C., et al., การพยากรณ์ปริมาณและราคาส่งออกน้ำมันปาล์มดิบของประเทศไทย: กรณีศึกษาการวิเคราะห์ทางอนุกรมเวลา. Journal of Modern Learning Development, 2021. 6(4): p. 315-329.
9. “กรรมวิธีการเพิ่มค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของน้ำมันที่ได้จากพืชเพื่อใช้งานในหม้อแปลงไฟฟ้า” เลขที่คำขอ 2103001245 ผู้ประดิษฐ์ บัญญาวัฒน์ อยู่สุข บวรชัย เจริญธีรบูรณ์ ปฐมพงศ์ เจนไธสง พรประภา พิทักษ์จักรพิภพ.
10. Husnayain, F., M. Latif, and I. Garniwa, Transformer oil lifetime prediction using the Arrhenius law based on physical and electrical characteristics, in 2015 International Conference on Quality in Research (QiR). 2015. p. 115-120.

11. Thiviyathan, V.A., et al., Power transformer insulation system: A review on the reactions, fault detection, challenges and future prospects. Alexandria Engineering Journal, 2022. 61(10): p. 7697-7713.
12. Obande, J.O. and J.U. Agber, Palm Oil As An Alternative Dielectric Transformer Coolant. Int. J. Res. Eng. Sci, 2014. 2: p. 8-13.
13. Hamid, M.H.A., et al., Electrical properties of palm oil and rice bran oil under AC stress for transformer application. Alexandria Engineering Journal, 2022. 61(11): p. 9095-9105.
14. Meira, M., et al., Dissolved gas analysis differences between natural esters and mineral oils used in power transformers: a review. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019. 13(24): p. 5441-5448.
15. IEC 60296. Fluids for electrotechnical applications-Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear. 2012, Geneve.
16. IEC 62770. Fluids for electrotechnical applications-Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment. 2013, Geneve.
17. สอนอุไร, ศ., ฉนวนเหลวในหม้อแปลง. วารสารอิทไทย, 2014. 11: p. 10-11.
18. Bhattacharya, S., S. Dalai, and B. Chatterjee. Suitability of Alternate Fluids as Transformer Insulation-A Comprehensive Review. in 2020 International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE). 2020. IEEE.
19. Arora, R. and W. Mosch, High voltage and electrical insulation engineering. 2022: John Wiley & Sons.
20. Munajad, A. and C. Subroto, Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Analysis of Transformer Paper in Mineral Oil-Paper Composite Insulation under Accelerated Thermal Aging. Energies, 2018. 11(2).
21. Mariprasath, T. and V. Kirubakaran, A critical review on the characteristics of alternating liquid dielectrics and feasibility study on pongamia pinnata oil as liquid dielectrics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. 65: p. 784-799.
22. Maneerot, S., et al. Studies of electrical and thermal characteristics of natural ester immersed transformer compared with mineral oil immersed and palm oil

- immersed transformer. in 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). 2018. IEEE.
23. Jacob, J., P. Preetha, and S. Thiruthi Krishnan, Review on natural ester and nanofluids as an environmental friendly alternative to transformer mineral oil. *IET Nanodielectrics*, 2020. 3(2): p. 33-43.
  24. Mohamad, N.A., et al., Investigation on the Dielectric, Physical and Chemical Properties of Palm Oil and Coconut Oil under Open Thermal Ageing Condition. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2016. 11(3): p. 690-698.
  25. Hosier, I., et al., Aging of biodegradable oils and assessment of their suitability for high voltage applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011. 18(3): p. 728-738.
  26. Martins, M.A.G., Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers-experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2010. 26(6): p. 7-13.
  27. Munajad, A. and C. Subroto, Study on the Effects of Thermal Aging on Insulating Paper for High Voltage Transformer Composite with Natural Ester from Palm Oil Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). *Energies*, 2017. 10(11).
  28. SzczeŚniak, D. and P. Przybyłek, Oxidation Stability of Natural Ester Modified by Means of Fullerene Nanoparticles. *Energies*, 2021. 14(2).
  29. Shen, Z., et al., A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. 141.
  30. Hiramatsu, Y., K. Kamidani, and Y. Muramoto. Effect of water on AC breakdown properties of vegetable-oil-based insulating fluid mixed with mineral oil. in 2017 International symposium on electrical insulating materials (ISEIM). 2017. IEEE.
  31. Gomez, N.A., et al., Chemical and spectroscopic characterization of a vegetable oil used as dielectric coolant in distribution transformers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2011.
  32. Roslan, M.H., et al., Latest developments of palm oil as a sustainable transformer fluid: A green alternative to mineral oils. *Biointerface Res. Appl.*

- Chem, 2021. 11(5): p. 13715-13728.
33. Kano, T., et al. Study on the oxidative stability of palm fatty acid ester (PFAE) as an insulating oil for transformers. in 2012 IEEE International symposium on electrical insulation. 2012. IEEE.
  34. Fernández-Diego, C., et al., Assessment of the effect of commercial vegetal oils on Kraft paper ageing through mechanical characterization. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018. 25(5): p. 1880-1887.
  35. Bandara, K., et al., Understanding the ageing aspects of natural ester based insulation liquid in power transformer. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016. 23(1): p. 246-257.
  36. Meshkatoddini, M.R. and S. Abbospour, Aging study and lifetime estimation of transformer mineral oil. American journal of engineering and applied sciences, 2008. 1(4): p. 384-388.
  37. Azis, N. and Z. Wang. Acid generation study of natural ester. in Proceedings of the XVII international symposium on high voltage engineering, Hannover, Germany. 2011.
  38. Xu, Y., et al., Oxidation stability assessment of a vegetable transformer oil under thermal aging. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014. 21(2): p. 683-692.
  39. Sherwin, E., Oxidation and antioxidants in fat and oil processing. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1978. 55(11): p. 809-814.
  40. Tenbohlen, S. and M. Koch, Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010. 25(2): p. 825-830.
  41. Fox, N.J. and G.W. Stachowiak, Vegetable oil-based lubricants—A review of oxidation. Tribology International, 2007. 40(7): p. 1035-1046.
  42. Mohamad, N., et al., Physiochemical and Electrical Properties of Refined, Bleached and Deodorized Palm Oil under High Temperature Ageing for Application in Transformers. Energies, 2018. 11(6).
  43. Poletto, M., V. Pistor, and A. J, Structural Characteristics and Thermal Properties of Native Cellulose, in Cellulose - Fundamental Aspects. 2013.

44. Ese, M.-h.G., et al., Esterification of low molecular weight acids in cellulose. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014. 21(2): p. 662-665.
45. Force, C.T., Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers. 2007.
46. Teymouri, A. and B. Vahidi, Estimation of power transformer remaining life from activation energy and pre-exponential factor in the Arrhenius equation. *Cellulose*, 2019. 26(18): p. 9709-9720.
47. Medina, R.D., et al., Assessing degradation of power transformer solid insulation considering thermal stress and moisture variation. *Electric Power Systems Research*, 2017. 151: p. 1-11.
48. Lelekakis, N., D. Martin, and J. Wijaya, Ageing rate of paper insulation used in power transformers Part 2: Oil/paper system with medium and high oxygen concentration. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012. 19(6): p. 2009-2018.
49. Liland, K.B., et al., Study of oxidation and hydrolysis of oil impregnated paper insulation for transformers using a microcalorimeter. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011. 18(6): p. 2059-2068.
50. Lelekakis, N., et al., The effect of acid accumulation in power-transformer oil on the aging rate of paper insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2014. 30(3): p. 19-26.
51. Kouassi, K., et al., Impact of Low Molecular Weight Acids on Oil Impregnated Paper Insulation Degradation. *Energies*, 2018. 11(6).
52. Kaliappan, G. and M. Rengaraj, Aging assessment of transformer solid insulation: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021. 47: p. 272-277.
53. Przybylek, P., Z. Nadolny, and H. Moscicka-Grzesiak, Bubble effect as a consequence of dielectric losses in cellulose insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010. 17(3): p. 913-919.
54. Rafiq, M., et al., Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications. *Molecules*, 2020. 25(17).
55. Singh, J., Y.R. Sood, and P. Verma, The influence of service aging on transformer insulating oil parameters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012. 19(2): p. 421-426.

56. N'cho, J., et al., Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. *Energies*, 2016. 9(5).
57. Lewand, L.R. Practical experience gained from furanic compound analysis. in *Proceedings of the 73rd Annual International Doble Client Conference*, Boston, MA, USA. 2006.
58. Ridzuan, N.L.M., et al., Comparative study on the accelerated thermal aging behavior between palm and rapeseed natural ester oils. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2019. 8(3): p. 735-743.
59. Taslak, E., et al., Analyses of the insulating characteristics of mineral oil at operating conditions. *Electrical Engineering*, 2017. 100(1): p. 321-331.
60. Group, I.C.W., *IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers*. 2011, IEEE New York, NY, USA.
61. Duckett, D., C. Arpino, and S. McNelly, *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*. *IEEE Std C*, 2012. 57: p. 1-123.
62. Ariffin, M., et al. Ageing effect of vegetable oils impregnated paper in transformer application. in *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. 2017. IEEE.
63. Subburaj, S.K., M. Rengaraj, and R. Mariappan, Evaluating critical characteristics of vegetable oil as a biodegradable insulating oil for transformer. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2020. 0(0).
64. Bandara, K., et al., Performance of Natural Ester as a Transformer Oil in Moisture-Rich Environments. *Energies*, 2016. 9(4).
65. Tokunaga, J., et al., Lifetime estimation of cellulosic insulation material in palm fatty acid ester for power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017. 24(2): p. 1010-1017.
66. Abdelmalik, A., J. Fothergill, and S. Dodd. Aging of Kraft paper insulation in natural ester dielectric fluid. in *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. 2013. IEEE.
67. Dewi, T.I.D.K., et al. The Effects of Accelerated Thermal Aging on Chemical,

- Electrical, and Physical Properties of Natural Ester Oil. in 2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE). 2018. IEEE.
68. ASTM International. ASTM D1500. Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale). West Conshohocken: PA, USA, 2017.
  69. ASTM International. ASTM D445. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). West Conshohocken: PA, USA, 2006.
  70. ASTM International. ASTM D971. Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method. West Conshohocken: PA, USA, 2012.
  71. ASTM International. ASTM D1533. Standard Test Method for Water in Insulating Liquids By Coulometric Karl Fischer Titration. West Conshohocken: PA, USA, 2012.
  72. ASTM International. ASTM D971. Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. West Conshohocken: PA, USA, 2015.
  73. ASTM International. ASTM D6802. Test Method for Determination of the Relative Content Of Dissolved Decay Products in Mineral Insulating Oils by Spectrophotometry. West Conshohocken: PA, USA, 2002.
  74. ASTM International. ASTM D5837. Standard Test Method for Furanic Compounds in Electrical Insulating Liquids by High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). West Conshohocken: PA, USA, 2005.
  75. IEC 60156. Insulating Liquids—Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency—Test Method. 2018, International Electrotechnical Commission (IEC) Geneva, Switzerland.
  76. IEC 60247. Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor and DC Resistivity of Insulating Liquids. 2004, International Electrotechnical Commission Geneva, Switzerland.
  77. ASTM International. ASTM D828. Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus West Conshohocken: PA, USA, 2002.
  78. ASTM International. ASTM D4243. Standard Test Method for Measurement of Average Viscometric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical



- Papers and Boards. West Conshohocken: PA, USA, 2010.
79. Abdi, S., et al., Influence of Artificial Thermal Aging on Transformer Oil Properties. *Electric Power Components and Systems*, 2011. 39(15): p. 1701-1711.
  80. Fofana, I., et al., Decay products in the liquid insulation of power transformers. *IET Electric Power Applications*, 2010. 4(3).
  81. Fofana, I., et al., Ageing Behaviour of Mineral Oil and Ester Liquids: a Comparative Study, in *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2008. p. 87-90.
  82. Liao, R., et al., Investigation on thermal aging characteristics of vegetable oil-paper insulation with flowing dry air. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013. 20(5): p. 1649-1658.
  83. Münster, T., et al., Thermally Accelerated Aging of Insulation Paper for Transformers with Different Insulating Liquids. *Energies*, 2021. 14(11).
  84. Li, J., et al., Characteristics of moisture diffusion in vegetable oil-paper insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012. 19(5): p. 1650-1656.
  85. Lashbrook, M., H. Al-Amin, and R. Martin. Natural ester and synthetic ester fluids, applications and maintenance. in *2017 10th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference (JIEEEEC)*. 2017. IEEE.
  86. Yao, W., et al., Acids generated and influence on electrical lifetime of natural ester impregnated paper insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018. 25(5): p. 1904-1914.
  87. Rao, U.M., H. Pulluri, and N.G. Kumar, Performance analysis of transformer oil/paper insulation with ester and mixed dielectric fluids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018. 25(5): p. 1853-1862.
  88. Boyekong, G.O., G.M. Mengounou, and A.M. Imano, Comparative Evaluation of the Thermal Aging of Solid Insulation in Mineral Oil and Methyl Ester of Palm Kernel Oil. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2021. 09(05): p. 166-183.
  89. Rao, U.M., Y.R. Sood, and R.K. Jarial, Performance analysis of alternate liquid dielectrics for power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016. 23(4): p. 2475-2484.

90. Kasaikina, O.T., L.M. Pisarenko, and V.I. Lesin, Colloidal catalysts based on iron(III) oxides. 2. Peculiarities of catalyzed oxidation of palm oil. *Colloid Journal*, 2012. 74(4): p. 483-488.
91. Domingos, A.K., et al., The influence of BHA, BHT and TBHQ on the oxidation stability of soybean oil ethyl esters (biodiesel). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2007. 18(2): p. 416-423.
92. Unsworth, J. and F. Mitchell, Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography. *IEEE transactions on electrical insulation*, 1990. 25(4): p. 737-746.
93. Zhang, E., et al., State-of-Art Review on Chemical Indicators for Monitoring the Aging Status of Oil-Immersed Transformer Paper Insulation. *Energies*, 2023. 16(3).
94. Ly, N., et al., Impact of Support Oxide Acidity in Pt-Catalyzed HMF Hydrogenation in Alcoholic Medium. *Catalysis Letters*, 2016. 147(2): p. 345-359.
95. Selishcheva, S.A., et al., Highly Active CuFeAl-containing Catalysts for Selective Hydrogenation of Furfural to Furfuryl Alcohol. *Catalysts*, 2019. 9(10).
96. Ten, C., M. Fernando, and Z. Wang. Dielectric properties measurements of transformer oil, paper and pressboard with the effect of moisture and ageing. in *2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2007. IEEE.
97. Guo, P., et al. Research on the temperature dielectric spectrum of vegetable oil, mineral oil and their relevant oil-impregnated papers. in *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2012. IEEE.
98. Widyanugraha, T. and P. Didit. Dielectric properties of silicone oil, natural ester, and mineral oil under accelerated thermal aging. in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. 2012. IEEE.
99. Chouhan, A., R.K. Jarial, and U.M. Rao, Thermal Performance of Nomex-910 and TUK Insulating Papers in Soyabased Natural Ester Oil. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2020. 12(1): p. 59-71.
100. Suwarno, A.S., Investigation on thermal aging of ester from palm oil and kraft paper composite insulation system for high voltage transformer. *WSEAS Trans. Environ. Dev*, 2017. 13: p. 75-84.

101. Qian, Y.-H., et al., Study on Aging Characteristics and Chemical Composition of Hydrogenated Transformer Oil. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2013. 8(3): p. 588-594.
102. Sevastyanova, O., B. Pasalskiy, and B. Zhmud, Copper Release Kinetics and Ageing of Insulation Paper in Oil-Immersed Transformers. *Engineering*, 2015. 07(08): p. 514-529.
103. Feng, D., et al., Comparative Study on the Thermal-Aging Characteristics of Cellulose Insulation Polymer Immersed in New Three-Element Mixed Oil and Mineral Oil. *Polymers (Basel)*, 2019. 11(8).
104. Shim, M.-S. Comparative evaluation of aging of insulating, material in natural ester and mineral oil. in 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application. 2010. IEEE.
105. Zhang, X., et al., Dual-Temperature Evaluation of a High-Temperature Insulation System for Liquid-Immersed Transformer. *Energies*, 2018. 11(8).
106. McShane, C.P., et al. Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid. in 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No. 01CH37294). 2001. IEEE.
107. Liao, R., et al., A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil. *European Transactions on Electrical Power*, 2009: p. n/a-n/a.
108. Frimpong, G.K., T. Oommen, and R. Asano, A survey of aging characteristics of cellulose insulation in natural ester and mineral oil. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2011. 27(5): p. 36-48.

### ภาคผนวก ก

#### ก.1 อัตราส่วนของน้ำมันหม้อแปลง กระดาษฉนวนเซลลูโลส และโลหะที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE std.C57.91-2011 ดังแสดงในตารางที่ ก1 โดยเลือกใช้อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (distribution transformer)

ตารางที่ ก1 อัตราส่วนของน้ำมันหม้อแปลง และกระดาษฉนวนที่ใช้ตามชนิดหม้อแปลงไฟฟ้า[60]

Material	Transformer type	
	Power	Distribution
Insulating liquid	200 cm <sup>3</sup>	200 cm <sup>3</sup>
0.05 to 0.10 mm conductor insulation	6.4 cm <sup>3</sup>	
0.13 to 0.38 mm layer insulation		11.2 cm <sup>3</sup>
1.00 to 3.00 mm low-density pressboard		1.2 cm <sup>3</sup>
2.00 to 8.00 mm high-density pressboard	16.4 cm <sup>3</sup>	
Ratio—liquid to solid	8.8 to 1	16.3 to 1

เมื่อเทียบกับปริมาตรของน้ำมันฉนวนที่ต้องใช้ในการทดลอง คือ 2,000 cm<sup>3</sup> จะคำนวณหาปริมาตรของกระดาษฉนวนทั้งหมดได้ 112 cm<sup>3</sup> ซึ่งในการทดลองนี้ใช้กระดาษฉนวนทั้งหมด 4 ชนิด จึงคำนวณหาปริมาตรของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดที่ต้องใช้  $\frac{112}{4} = 28$  cm<sup>3</sup> และเมื่อเปลี่ยนหน่วยเป็นพื้นที่ผิวของกระดาษฉนวนแต่ละชนิดคำนวณได้ดังนี้

1. กระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. คำนวณหาพื้นที่ผิวได้  $\frac{28}{0.013} = 2,155$  cm<sup>2</sup>
2. กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. คำนวณหาพื้นที่ผิวได้  $\frac{28}{0.018} = 1,555$  cm<sup>2</sup>
3. กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์คัท คำนวณหาพื้นที่ผิวได้  $\frac{28}{0.018} = 1,555$  cm<sup>2</sup>
4. กระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม. คำนวณหาพื้นที่ผิวได้  $\frac{28}{0.05} = 560$  cm<sup>2</sup>

ดังนั้นพื้นที่ผิวของกระดาษฉนวนทั้งหมดที่ต้องใช้ คือ 2,154 + 1,555 + 1,555 + 560 = 5,825 cm<sup>2</sup>

อัตราส่วนของทองแดงที่ต้องใช้จะคิดเทียบจากพื้นที่ผิวของกระดาษฉนวนทั้งหมดที่ต้องใช้ คือ 5,825 cm<sup>2</sup> เนื่องจากกระดาษฉนวนจะพันรอบขดลวดทองแดงตัวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า

อัตราส่วนของเหล็กซิลิคอนที่ต้องใช้คำนวณได้จากน้ำหนักของทองแดงที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยข้อมูลจากบริษัท เจริญชัยหม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ดังแสดงในรูปที่ ก1

Transformer : 3Phase 150kVA 24kV 416/240V Dyn1 ,50Hz (Spec.MEA) , TR.Code 302311			
น้ำหนักเหล็กซิลิคอน เกรด Laser (หรือเกรดอื่นที่คุณสมบัติเท่าเทียมกัน)	461 กิโลกรัม	42.50%	
น้ำหนักทองแดง HV+LV	357 กิโลกรัม	32.91%	
น้ำมัน Mineral oil , 293ลิตร	267 กิโลกรัม	24.58%	
น้ำมัน FR3 oil , 293ลิตร	281 กิโลกรัม	25.59%	

รูปที่ ก1 อัตราส่วนของเหล็กซิลิคอน ทองแดง และน้ำมันฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงไฟฟ้า

จากคำนวณหาน้ำหนักเหล็กซิลิคอนต่อน้ำหนักของทองแดงจะได้  $\frac{461}{357} = 1.3$  เท่า

ดังนั้นน้ำหนักของเหล็กซิลิคอนจึงมีค่าเป็น 1.3 เท่าของน้ำหนักทองแดง ซึ่งในการทดลองนี้น้ำหนักของทองแดงมีค่า 261 กรัม จึงคำนวณหาน้ำหนักของเหล็กซิลิคอนได้  $261 \times 1.3 = 339.3$  กรัม และ

เมื่อเปลี่ยนเป็นหน่วยพื้นที่ผิวของเหล็กซิลิคอนจะมีค่า  $\frac{339.3}{0.027 \times 7.65} = 1,643 \text{ cm}^2$

ดังนั้นในการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนของโดยปริมาตรของน้ำมันหม้อแปลง : ปริมาตรของกระดาษฉนวน คือ  $200 \text{ cm}^3 : 11.2 \text{ cm}^3$  และอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำมันหม้อแปลง : พื้นที่ผิวของเหล็กซิลิคอน : พื้นที่ผิวของทองแดง คือ  $200 \text{ cm}^3 : 528.5 \text{ cm}^2 : 164.3 \text{ cm}^2$

## ก.2 การหาน้ำหนักแห้งและน้ำหนักหลังผ่านการอบของกระดาษฉนวนเซลลูโลส

สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis : TGA) โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ 0.5 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ ก2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำหนักของกระดาษฉนวนแต่ละชนิด ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 100 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียของน้ำหนักที่แตกต่างกัน เนื่องจากการมีอยู่ของปริมาณความชื้น ดังแสดงในตารางที่ ก2

ตารางที่ ก2 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและร้อยละน้ำหนักแห้งของกระดาษฉนวนแต่ละชนิด

ชนิดของกระดาษฉนวน	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (wt%)	ร้อยละของน้ำหนักแห้ง (wt%)
ความหนา 0.13 มม.	7.38%	92.62%
ความหนา 0.18 มม.	8.52%	91.48%
ความหนา 0.18 มม. แบบไดมอนด์	7.76%	92.24%
ความหนา 0.5 มม.	8.24%	91.76%

ดังนั้นจากผล TGA จึงคำนวณหาน้ำหนักแห้งของกระดาษฉนวนที่ใช้จริงได้จาก

น้ำหนักของกระดาษฉนวนที่ซื้อมา (กรัม) × ร้อยละของน้ำหนักแห้ง

โดยมีตัวอย่างดังต่อไปนี้

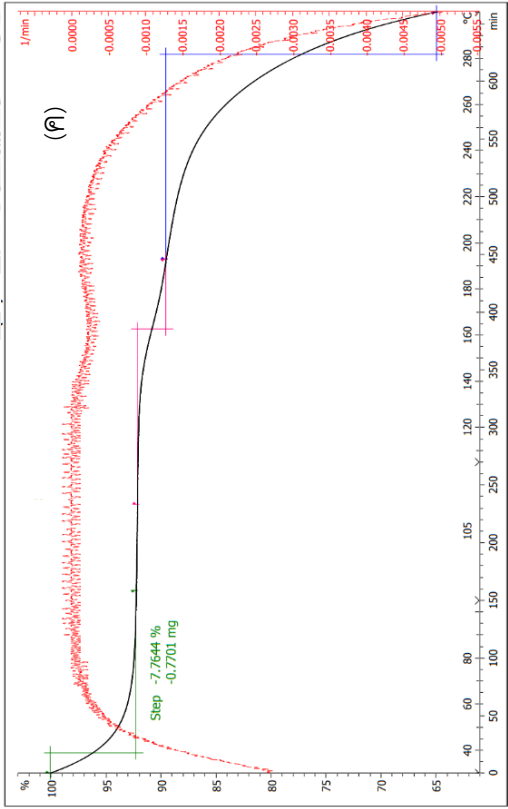
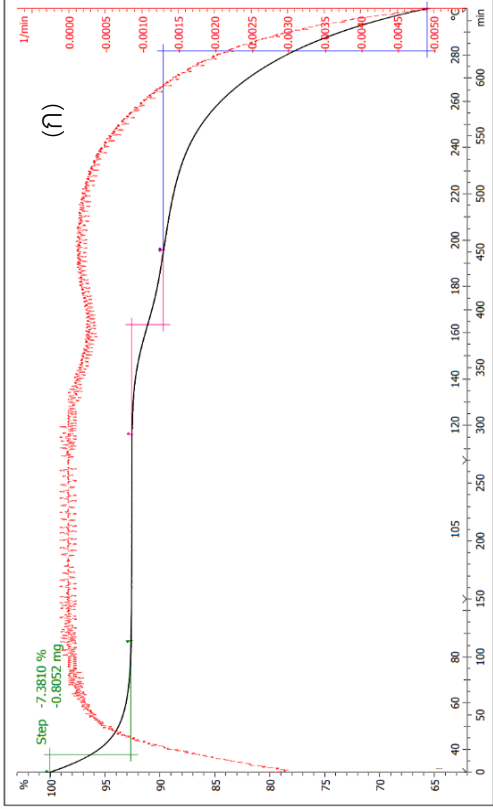
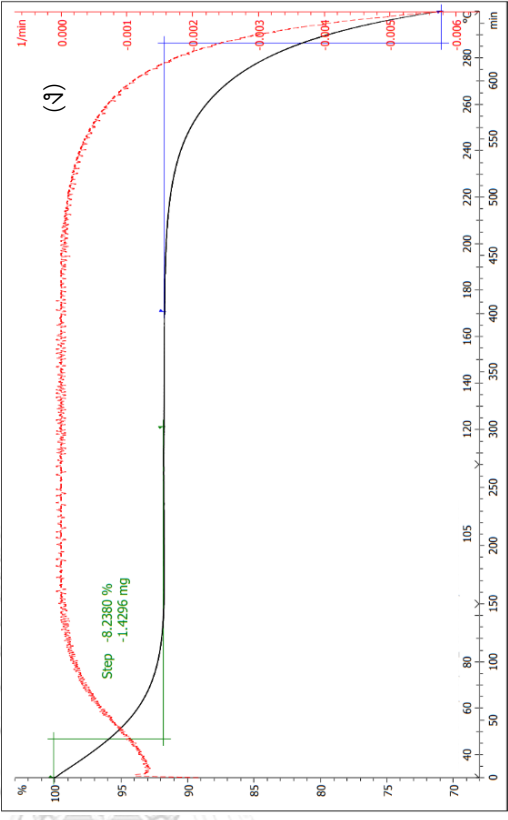
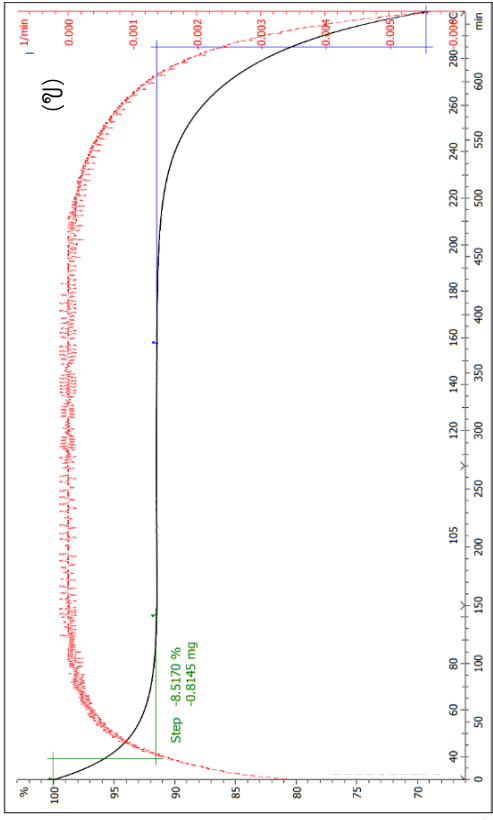
หากน้ำหนักของกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. ที่ซื้อมาได้ 14.62 กรัม

แสดงว่าน้ำหนักแห้งของกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่า  $14.62 \times \frac{92.62}{100} = 13.54$  กรัม

ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE C57.100 กำหนดก่อนการทดสอบกระดาษฉนวน ต้องทำการอบ เพื่อปรับปริมาณความชื้นภายในให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.25% - 0.50% ของน้ำหนักแห้ง ดังนั้นน้ำหนักที่ซื้อมาได้ของกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. หลังจากผ่านการอบควรมีค่าอยู่ระหว่าง 13.58 - 13.61 กรัม โดยคำนวณได้เมื่อทราบน้ำหนักแห้งของกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่า 13.54 กรัม

ถ้ากระดาษฉนวนมีปริมาณความชื้น 0.25% แสดงว่าน้ำหนักของความชื้นในกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่า  $13.54 \times \frac{0.25}{100} = 0.04$  กรัม ดังนั้นหลังจากผ่านการอบ น้ำหนักของกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่า  $13.54 + 0.04 = 13.58$  กรัม

ถ้ากระดาษฉนวนมีปริมาณความชื้น 0.50% แสดงว่าน้ำหนักของความชื้นในกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่า  $13.54 \times \frac{0.50}{100} = 0.07$  กรัม ดังนั้นหลังจากผ่านการอบ น้ำหนักของกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. มีค่า  $13.54 + 0.07 = 13.61$  กรัม



รูปที่ ก2 ผล TGA ของ (ก) กระดาษฉนวนความหนา 0.13 มม. (ข) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. (ค) กระดาษฉนวนความหนา 0.18 มม. (ง) กระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม. และ (ง) กระดาษฉนวนความหนา 0.5 มม.

### ภาคผนวก ข

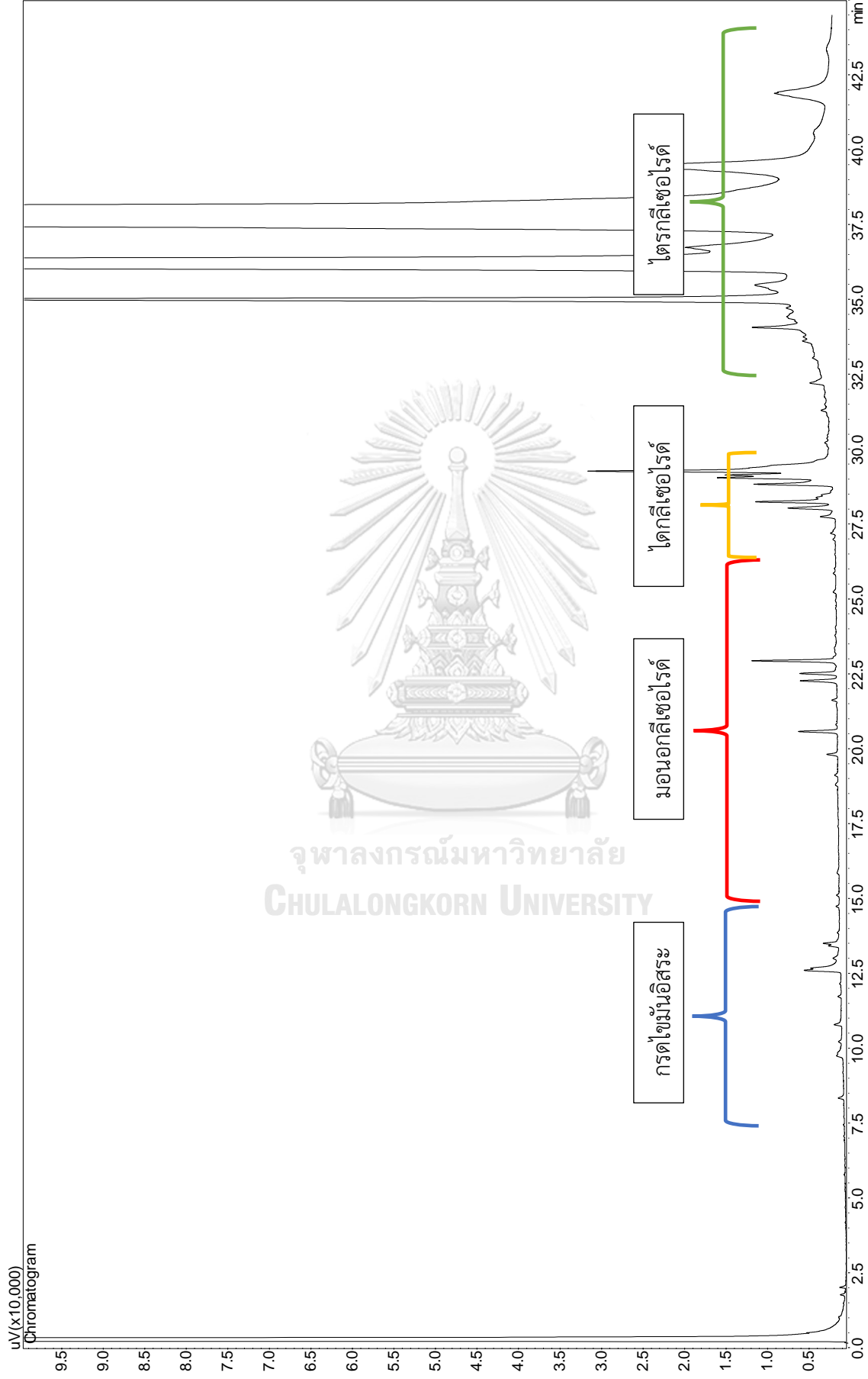
#### ข.1 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบต่างๆที่เกิดขึ้นในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติได้แก่ เอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 ประกอบด้วย flame ionization detector (FID) โดยมี คอลัมน์แบบ Elite5HT ซึ่งแสดงพีคต่างๆที่เกิดขึ้นในผลโครมาโตแกรมดังรูปที่ ข1 – ข2 โดยพีคที่เกิดขึ้นนั้นจะแสดงองค์ประกอบชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ ข1

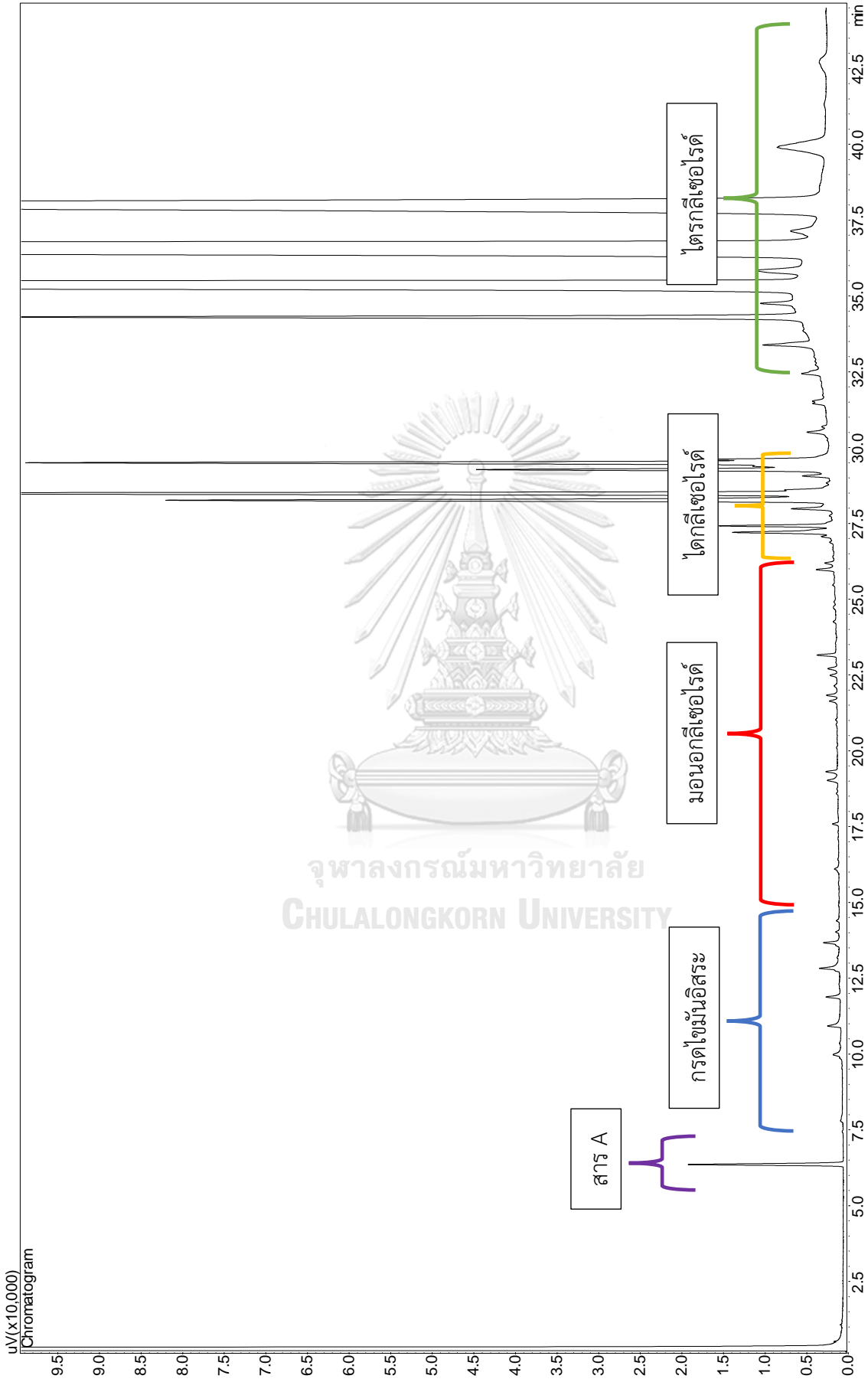
ตารางที่ ข1 พีคที่แสดงถึงองค์ประกอบที่พบใน FR3 และ EnPAT

องค์ประกอบ	Retention time (second)	หมายเหตุ
สารประกอบ A	6.0 – 7.0	พบเฉพาะใน EnPAT
กรดไขมันอิสระ	7.0 – 15.2	
มอนอกลิเซอไรด์	15.2 – 26.5	พบทั้งใน FR3 และ EnPAT
ไดกลีเซอไรด์	26.5 -29.5	
ไตรกลีเซอไรด์	33.0 – 44.5	





รูปที่ ข1 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆในเอสเตอร်ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3)



รูปที่ ข2 โครมาโทแกรมแสดงองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT)

## ข.2 การคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันชนิดต่างๆในน้ำมันกลุ่มเอสเทอร์ธรรมชาติ

จากผลของโครมาโตแกรมทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันชนิดต่างๆ ได้แก่ กรดไขมันอิสระ มอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ที่เป็นองค์ประกอบภายใน เอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) และน้ำมันชีวภาพฐานปาล์ม (EnPAT) ซึ่งมีสูตรที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$1. \text{เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของกรดไขมันอิสระ}}{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดที่เกิดขึ้น}} \times 100\%$$

$$2. \text{เปอร์เซ็นต์ของมอนอกลิเซอไรด์} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของมอนอกลิเซอไรด์}}{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดที่เกิดขึ้น}} \times 100\%$$

$$3. \text{เปอร์เซ็นต์ของไดกลีเซอไรด์} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของไดกลีเซอไรด์}}{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดที่เกิดขึ้น}} \times 100\%$$

$$4. \text{เปอร์เซ็นต์ของไตรกลีเซอไรด์} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของไตรกลีเซอไรด์}}{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดที่เกิดขึ้น}} \times 100\%$$

การคำนวณแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

จากโครมาโตแกรมของเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) ดังในแสดงในรูปที่ ข1 ซึ่งจะได้พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของกรดไขมันแต่ละชนิดดังนี้

พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของกรดไขมันอิสระ	100,087.80
พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของมอนอกลิเซอไรด์	129,827.10
พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของไดกลีเซอไรด์	552,668.10
พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของไตรกลีเซอไรด์	27,816,216.10

ทำการหาผลรวมของพื้นที่ใต้พีคทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้โดย

$$(100,087.80 + 129,827.10 + 552,668.10 + 27,816,216.10) = 28,598,799.10$$

เมื่อทราบผลรวมของพื้นที่ใต้พีคทั้งหมดที่เกิดขึ้นแล้ว จึงสามารถคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$1. \text{เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ} = \frac{100,087.80}{28,598,799.10} \times 100\% = 0.35\%$$

$$2. \text{เปอร์เซ็นต์ของมอนอกลิเซอไรด์} = \frac{129,827.10}{28,598,799.10} \times 100\% = 0.45\%$$

$$3. \text{เปอร์เซ็นต์ของไดกลีเซอไรด์} = \frac{552,668.10}{28,598,799.10} \times 100\% = 1.93\%$$

$$4. \text{เปอร์เซ็นต์ของไตรกลีเซอไรด์} = \frac{27,816,216.10}{28,598,799.10} \times 100\% = 97.26\%$$

ดังนั้นเอสเทอร์ธรรมชาติเชิงการค้า (FR3) ประกอบด้วยปริมาณของกรดไขมันอิสระ 0.35% มอนอกลิเซอไรด์ 0.45% ไดกลีเซอไรด์ 1.93% และไตรกลีเซอไรด์ 97.26% ตามลำดับ



## ภาคผนวก ค

### ค.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนเซลลูโลส

นำกระดาษฉนวนความหนา 0.13 มิลลิเมตร ทั้งก่อนและหลังจากผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อน ไปทดสอบความคงทนต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ปรากฏค่าแรงดึงสูงสุดที่กระดาษฉนวนก่อนการบ่มแรงและหลังจากผ่านการบ่มแรงสามารถต้านทานได้ก่อนเกิดการฉีกขาดมีค่า 400 และ 250 นิวตัน ตามลำดับ โดยกระดาษฉนวนที่ใช้ทดสอบมีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร และความยาว 254 มิลลิเมตร

การคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนได้ดังนี้

$$\text{ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนก่อนการบ่มแรง} = \frac{0.4}{0.025} = 16 \text{ กิโลนิวตัน/เมตร}$$

$$\text{ค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนหลังการบ่มแรง} = \frac{0.25}{0.025} = 10 \text{ กิโลนิวตัน/เมตร}$$

### ค.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนเซลลูโลส

เมื่อทราบค่าความคงทนต่อแรงดึงของกระดาษฉนวนทั้งก่อนและหลังจากผ่านการบ่มแรง ดังแสดงตัวอย่างใน ค.1 จะสามารถคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวนได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าความคงทนต่อแรงดึงคงเหลือของกระดาษฉนวน} = \frac{10}{16} \times 100\% = 62.5\%$$

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พรพงษ์ ศิริรัตน์สกุล
วัน เดือน ปี เกิด	09 สิงหาคม 2537
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษา ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และเข้าศึกษาต่อวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและ วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563
ที่อยู่ปัจจุบัน	98/261 หมู่ 5 ต.บางพลับ อ.ปากเกร็ด นนทบุรี

