

การศึกษผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเพรสบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตและการประเมิน  
อายุใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

THE STUDY ON DIELECTRIC RESPONSE OF IMPREGNATED PRESSBOARD AND  
TRANSFORMER REMAINING LIFE ASSESSMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-027-239

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY ON DIELECTRIC RESPONSE OF IMPREGNATED PRESSBOARD AND  
TRANSFORMER REMAINING LIFE ASSESSMENT



KOMIN CHUMPIBOON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING  
(MULTI-DISCIPLINARY PROGRAM)  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2024  
KMUTL-2024-EN-M-027-239

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเพอร์สโอบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตและการประเมินอายุใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า
นักศึกษา	นายโกมินทร์ ชุมพิบูลย์
รหัสประจำตัว	65016014
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ผศ.ดร. ภาพ จันท์เจริญสุข

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเพอร์สโอบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว 2 ชนิดคือ น้ำมันแร่ และเอสเทอร์ธรรมชาติ และการเปรียบเทียบเทคนิคในการประเมินปริมาณความชื้นในเพอร์สโอบอร์ดจาก วิธีการไทเทรต เทคนิค Coulometric Karl Fisher ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบโดยตรงและการประมาณจากการทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (FDS) ในงานวิจัยนี้เพอร์สโอบอร์ดจะถูกอบเพื่อปรับสภาพให้มีค่าความชื้นใกล้เคียงกันจากนั้นจะถูกนำไปอิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลวที่ต่างกัน เป็นระยะเวลา 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นเพอร์สโอบอร์ดที่ผ่านการอิมเพรกเนตแล้วจะถูกนำไปอบด้วยความร้อน 150 องศาเซลเซียสเพื่อทำให้เสื่อมสภาพ เป็นระยะเวลา 0, 30 และ 90 วัน เพื่อศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกและเปรียบเทียบปริมาณความชื้นในเพอร์สโอบอร์ด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่สามารถประมาณปริมาณความชื้นได้ใกล้เคียงกับวิธีการวัดโดยการไทเทรต นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าเพอร์สโอบอร์ดที่ถูกอิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติมีการเสื่อมที่ช้ากว่าเพอร์สโอบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่ อีกทั้งยังอาจกล่าวได้อีกว่ากระบวนการอิมเพรกเนตยังคงดำเนินต่อไปแม้ว่าเพอร์สโอบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์จะอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิสูง ในส่วนที่สองของงานวิจัยเป็นการจัดทำดัชนีประเมินสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยวิธีที่ใช้ในการประเมินดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงซึ่งเดิมพัฒนาโดย Kinectrics Inc. (2009) ในแคนาดาถูกนำมาดัดแปลงเพื่อให้สะท้อนถึงสภาพของหม้อแปลงได้อย่างเด่นชัดหากมีความผิดปกติใดเกิดขึ้น โดยใช้เกณฑ์การตัดสินผลการทดสอบต่างๆตามมาตรฐานและคำแนะนำจาก CIGRE ในส่วนของการประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า การประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวนแข็งจะดำเนินการโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาโดย SINTEF Energy Research โดยเชื่อว่าแบบจำลองนี้อธิบายการย่อยสลายของเซลลูโลสในลักษณะที่ค่อนข้างแม่นยำ โดยใช้ความรู้ขั้นสูงเกี่ยวกับกลไกการย่อยสลายของฉนวนเซลลูโลส โดยใช้ปริมาณความชื้นจากการทดสอบ FDS เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลอินพุต ผลการประเมินทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันว่าหม้อแปลงสามารถใช้งานต่อไปได้อีกไม่ต่ำกว่า 15 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	THE STUDY ON DIELECTRIC RESPONSE OF IMPREGNATED PRESSBOARD AND TRANSFORMER REMAINING LIFE ASSESSMENT
<b>Student</b>	Mr. Komin Chumpiboon
<b>Student ID.</b>	65016014
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical and Computer Engineering (Multi-Disciplinary Program)
<b>Year</b>	2024
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech Assist. Prof. Dr. Phop Chancharoensook

## ABSTRACT

This thesis presents a study on the dielectric response of pressboard impregnated with two types of liquid insulators: mineral oil and natural ester. The research also compares techniques for assessing the moisture content in pressboard using titration by Coulometric Karl Fischer methods, which are direct testing methods, as well as estimation from Frequency Domain Spectroscopy (FDS) testing. In this study, the pressboards are conditioned to have a similar moisture content before being impregnated with each liquid insulation for 0, 8, 16, and 24 hours. Subsequently, the impregnated pressboards are thermally aged at 150°C for 0, 30, and 90 days to study the dielectric response and compare the moisture content in the pressboard. The test results indicate that FDS testing can estimate the moisture content closely to the titration method. Additionally, the study found that pressboard impregnated with natural ester degrades more slowly than that of mineral oil. It can also be inferred that the impregnation process continues even when the ester-impregnated pressboards are subjected to high temperatures. The second part of the research involves developing a health index for transformer condition assessment and evaluating the remaining life of transformers. The method used for evaluating the health index of transformers, originally developed by Kinectrics Inc. (2009) in Canada, is adapted to more clearly reflect the transformer's condition if any abnormalities exist and achieved by using criteria based on standards and recommendations from CIGRE. For evaluating the

remaining life of transformers, the degradation of cellulose insulation is assessed using a model developed by SINTEF Energy Research. This model is believed to accurately describe the decomposition of cellulose based on advanced knowledge of cellulose insulation degradation mechanisms, utilizing moisture content from FDS test results as part of the input data. Both assessment methods consistently indicate that the transformers can continue to be operational for at least another 15 years.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ศิวกร จินเมือง นักศึกษาปริญญาเอก ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือ เมื่อข้าพเจ้าทั้งในด้านวิชาการจนสำเร็จ และด้านการใช้ชีวิตให้มีความสุข

ขอขอบคุณ ปิยะ อุดมลักษณะานนท์ นักศึกษาปริญญาโท ในห้องปฏิบัติการการทดสอบและวินิจฉัยฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (Dika Lab) และเป็นเพื่อนร่วมงานของข้าพเจ้าที่คอยให้การสนับสนุนข้าพเจ้า จนสำเร็จงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท โกลบอล เพาเวอร์ ซินเนอร์ยี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ในงานวิจัย ตลอดจนคำแนะนำในงานภาคสนาม

ขอขอบคุณ กฤษดา ดอกไม้ และนายวิศรินทร์ โรจนสุนันท์ นักศึกษาในห้องปฏิบัติการการทดสอบและวินิจฉัยฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (Dika Lab) และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

โกมินทร์ ชุมพิบูลย์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	6
2.1.1 ส่วนประกอบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	6
2.1.2 หน้าที่ของส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	7
2.1.3 ระบบฉนวนของหม้อแปลง.....	9
2.2 ผลตอบสนองไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ในโดเมนความถี่ (FDS).....	15
2.3 แบบจำลอง X-Y.....	21
2.4 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (Health Indexing, HI).....	23
2.5 การประเมินอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	26
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ การจัดทำดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	30
3.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ การศึกษาผลตอบสนองไดโอดอิเล็กทรอนิกส์ในการประเมินปริมาณความชื้นในเพอร์สโอบอร์ดที่อิมเพกเนตจากฉนวนเหลว 2 ชนิด.....	30
3.1.2 การทดสอบองค์ประกอบความชื้น.....	33
3.1.3 การทดสอบองค์ประกอบความชื้นด้วยสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่.....	34
3.2 การจัดทำดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	36
3.2.1 การจัดทำดัชนีสุขภาพ.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	45
3.3 รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการประเมินและข้อมูลผลการทดสอบ .....	48
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล .....	53
4.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	53
4.1.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบการทดสอบองค์ประกอบความชื้นของตัวอย่างที่ใช้ น้ำมันแร่.....	53
4.1.2 ผลการทดสอบการทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ของตัวอย่างซึ่งถูกอิมเพรกเนตและถูกทำให้เสื่อมสภาพด้วยน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ .....	54
4.2 ผลดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	58
4.2.1 การจัดทำดัชนีสุขภาพ .....	58
4.2.2 การประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	67
5.1 สรุปผลการทดสอบ .....	67
5.1.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในการประเมินปริมาณความชื้นในเพอร์สอร์ตที่อิมเพรกเนตจากฉนวนเหลว 2 ชนิด .....	67
5.1.2 ดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	68
ข้อเสนอแนะ .....	68
เอกสารอ้างอิง .....	69
ภาคผนวก.....	71
ประวัติผู้เขียน .....	77

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ขั้นตอนการศึกษา .....	4
ตารางที่ 2.1	แสดงชื่อของส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละส่วน.....	7
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง.....	10
ตารางที่ 2.3	ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนที่ 20 องศาเซลเซียส.....	13
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนผสม (กระดาษและน้ำมัน) .....	14
ตารางที่ 2.5	ความสัมพันธ์ของคะแนนดัชนีสุขภาพและสถานะของหม้อแปลงสำหรับโมเดล KINECTRICS.....	25
ตารางที่ 2.6	ค่า A และ E สำหรับกระดาษกราฟภายใต้สภาพแวดล้อมทางเคมีที่แตกต่างกัน.....	26
ตารางที่ 2.7	ค่า A และ E สำหรับกระดาษอัดทางความร้อนภายใต้สภาพแวดล้อมทางเคมีที่ แตกต่างกัน.....	27
ตารางที่ 2.8	พารามิเตอร์การคำนวณที่ใช้ในการคำนวณฮอตสปอตของหม้อแปลงไฟฟ้าตามที่อธิบาย ไว้ใน IEC 60076-7.....	28
ตารางที่ 3.1	รายการตัวอย่างที่ถูกเตรียมสำหรับการทดลอง.....	32
ตารางที่ 3.2	ความสัมพันธ์ของคะแนนต่อระดับ DP.....	38
ตารางที่ 3.3	เกณฑ์การให้คะแนนและน้ำหนักตัวคุณสำหรับระดับความเข้มข้นของแก๊ส.....	41
ตารางที่ 3.4	เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส.....	42
ตารางที่ 3.5	การให้คะแนนสถานะของการวิเคราะห์แก๊สในน้ำมัน.....	43
ตารางที่ 3.6	เกณฑ์การให้คะแนนและน้ำหนักสำหรับพารามิเตอร์คุณภาพน้ำมัน.....	43
ตารางที่ 3.7	เกณฑ์การให้คะแนนสถานะของฉนวนเหลว.....	44
ตารางที่ 3.8	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาและค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมทางเคมีสำหรับการ คำนวณการย่อยสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสกระดาษ.....	46
ตารางที่ 3.9	รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกนำมาเพื่อประเมิน.....	48
ตารางที่ 3.10	สรุปผลการทดสอบทางไฟฟ้า.....	48
ตารางที่ 3.11	ผลการทดสอบและพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการทดสอบ FDS.....	50
ตารางที่ 3.12	ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน.....	50
ตารางที่ 3.13	ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊สตามมาตรฐาน IEC 60599-2015.....	51
ตารางที่ 3.14	ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง.....	51
ตารางที่ 4.1	ทดสอบการทดสอบองค์ประกอบความชื้นของตัวอย่างที่ใช้น้ำมันแร่.....	53
ตารางที่ 4.2	ทดสอบการทดสอบองค์ประกอบความชื้นของตัวอย่างที่ใช้น้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ..	57

ตารางที่ 4.3	เกณฑ์การประเมิน ผลการทดสอบและคะแนนในหัวข้อการทดสอบทางไฟฟ้า .....	58
ตารางที่ 4.4	ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบความสูญเสียกับสภาพของฉนวน.....	60
ตารางที่ 4.5	ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นอิมมิตีวในน้ำมันที่แปลงเป็นปริมาณความชื้นใน กระดาษต่อสถานะของฉนวน.....	60
ตารางที่ 4.6	ผลลัพธ์การคำนวณคะแนนระดับความเข้มข้นของแก๊ส.....	62
ตารางที่ 4.7	ผลการคำนวณคะแนนของอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส .....	62
ตารางที่ 4.8	ผลการให้คะแนนการทดสอบ ผลคะแนน OQF และคะแนนสถานะของคุณภาพน้ำมัน	63
ตารางที่ 4.9	ความสัมพันธ์ของดัชนีสุขภาพและอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	64
ตารางที่ 4.10	สรุปปีที่หม้อแปลงคาดว่าจะหมดอายุการใช้งาน (DP=300) จากสภาพเงื่อนไขต่างๆ	66



# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของส่วนประกอบพื้นฐานของน้ำมันแร่ .....	10
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอสเทอร์ธรรมชาติ .....	11
รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายตามธรรมชาติของฉนวนเหลวชนิดต่าง ๆ .....	11
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาว์นและค่าความชื้นของฉนวนเหลวชนิดต่าง ๆ .....	12
รูปที่ 2.6 ฉนวนแข็ง (ก) กระดาษอัดแรงดัน (เพอร์สบอร์ด) (ข) กระดาษคราฟท์ .....	13
รูปที่ 2.7 โครงสร้างเซลลูโลสและการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส .....	15
รูปที่ 2.8 ความหลากหลายของปัจจัยการสูญเสียของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบกับความถี่ .....	17
รูปที่ 2.9 เส้นโค้ง FABRE-PICHON สำหรับการกระจายความชื้นในกระดาษคราฟท์และน้ำมัน .....	19
รูปที่ 2.10 $\tan \delta$ ของโครงสร้างของฉนวนที่แตกต่างกันสำหรับอัตราส่วนน้ำมันและเพอร์สบอร์ด .....	21
รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางของโครงสร้างฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	22
รูปที่ 2.12 แบบจำลอง X-Y ของโครงสร้างฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	23
รูปที่ 2.13 แผนผังแสดงการคำนวณดัชนีสุขภาพ ข้อมูลอินพุตที่ต้องการ และขั้นตอนการคำนวณ .....	24
รูปที่ 2.14 แผนภาพความร้อนแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิแนวตั้งสำหรับน้ำมันและขดลวด ตามที่อธิบายไว้ใน IEC 60076-7 แกนนอนแสดงถึงอุณหภูมิในขณะที่แกนแนวตั้งแสดงถึง ตำแหน่งแนวตั้งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า .....	29
รูปที่ 3.1 เอสเทอร์ธรรมชาติที่ถูกนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้นส่วนเกินออก .....	31
รูปที่ 3.2 เพอร์สบอร์ดที่ถูกจัดเรียงและนำไปอบ .....	31
รูปที่ 3.3 เพอร์สบอร์ดที่ถูกจัดเรียงและนำไปอิมเพรกเนต .....	31
รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบองค์ประกอบความชื้น .....	33
รูปที่ 3.5 เพอร์สบอร์ดที่ใช้ในการทดสอบและเพอร์สบอร์ดซึ่งถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก .....	34
รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ .....	35
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมจากโปรแกรม OMICRON Primary Test Manager .....	35
รูปที่ 3.8 แผนผังวิธีคำนวณคะแนนดัชนีสุขภาพ .....	37
รูปที่ 3.9 แผนผังวิธีคำนวณคะแนนสถานะของฉนวนภายในหม้อแปลง .....	38
รูปที่ 3.10 แผนผังวิธีคำนวณคะแนนสถานะของ DGA .....	40
รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมภาพรวมของการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	47
รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบ FDS ของส่วนฉนวนหลักในหม้อแปลงแสดงผลในรูปแบบขององค์ประกอบ ความสูญเสียในช่วงความถี่ 0.1 mHz - 200 Hz .....	49
รูปที่ 3.13 โหลดรายชั่วโมงในปีที่เลือกมาใช้ในการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14	อุณหภูมิรายชั่วโมงของขดลวดแรงต่ำของปีที่ถูกเลือก .....	52
รูปที่ 4.1	เส้นโค้ง FDS ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกนตซึ่งถูกทำให้เสื่อมสภาพภายใต้ความเครียดจากความร้อนในเวลาเท่ากัน แต่มีระยะเวลาในการอิมเพกนตที่ต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.2	เส้นโค้ง FDS ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกนตในเวลาเท่ากัน แต่มีระยะเวลาในการถูกทำให้เสื่อมสภาพจากความร้อนที่ต่างกัน .....	56
รูปที่ 4.3	แผนผังซึ่งแสดงผลการคำนวณคะแนนสถานะของฉนวนหลักในหม้อแปลง .....	59
รูปที่ 4.4	ผลการทดสอบ FDS ของฉนวนหลัก (H-L) ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาค่าองค์ประกอบความสูญเสียที่ 1 mHz.....	61
รูปที่ 4.5	แผนผังซึ่งแสดงผลการคำนวณคะแนนสถานะของ DGA .....	63
รูปที่ 4.6	แผนผังซึ่งแสดงผลการคำนวณดัชนีสุขภาพ .....	64
รูปที่ 4.7	ผลลัพธ์ของระดับ DP ตลอดทั้งปีด้วยการคำนวณโดยใช้ข้อมูลปริมาณความชื้นและปริมาณแก๊ส O <sub>2</sub> จากผลการทดสอบครั้งล่าสุด .....	65
รูปที่ 4.8	เส้นโค้งประมาณระดับ DP ของฉนวนเซลลูโลส .....	66



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบไฟฟ้าที่มีบทบาทหลักในการแปลงแรงดันไฟฟ้าเพื่อการจ่ายพลังงานที่มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ ความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ามีผลกระทบต่อความมั่นคงและความปลอดภัยของระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้า หากเกิดความเสียหายหรือการล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้า อาจนำไปสู่การหยุดชะงักของการจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อผู้ใช้ไฟฟ้าและเศรษฐกิจโดยรวม ดังนั้น การประเมินสภาพและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำอย่างสม่ำเสมอ

หนึ่งในปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าคือความชื้นในฉนวนแห้ง ความชื้นในฉนวนแห้งสามารถทำให้คุณสมบัติไดอิเล็กทริกและความสามารถในการทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงได้ ซึ่งอาจนำไปสู่การล้มเหลวของหม้อแปลง นอกจากนี้ ความชื้นยังสามารถกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เป็นอันตรายและการเสื่อมสภาพทางกายภาพของวัสดุฉนวน ทำให้หม้อแปลงมีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายมากยิ่งขึ้น การประเมินและควบคุมปริมาณความชื้นในฉนวนแห้งจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงและป้องกันการเกิดความเสียหายด้วยเหตุนี้ การศึกษาและพัฒนาวิธีการใหม่ๆ ในการประเมินความชื้นและการเสื่อมสภาพของฉนวนแห้งจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ งานวิจัยในด้านนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้เราสามารถตรวจสอบสภาพของหม้อแปลงได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วขึ้น แต่ยังช่วยในการพัฒนากระบวนการบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่าย การใช้เทคนิคต่างๆ เช่น การทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (FDS) และเทคนิค Coulometric Karl Fischer ในการประเมินความชื้น เป็นตัวอย่างของความพยายามในการพัฒนาวิธีการที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้

ฉนวนเหลวเอสเทอร์ธรรมชาติเป็นฉนวนที่ผลิตจากน้ำมันพืชและมีคุณสมบัติที่ดีทั้งในด้านประสิทธิภาพและสิ่งแวดล้อม มีจุดวาบไฟและจุดติดไฟสูง ทำให้ปลอดภัยในการใช้งาน และมีความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูง ช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ เอสเทอร์ธรรมชาติยังมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่ดี และสามารถดูดซับความชื้นได้ดีกว่าน้ำมันแร่ ช่วยลดผลกระทบของความชื้นต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนแห้ง อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและมีความเป็นพิษต่ำ ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพดีและได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น แต่การศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานร่วมกับการทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (FDS) ซึ่งใช้ในการประเมินความชื้นในฉนวนยังมีไม่มากนัก งานวิจัยในด้านนี้ยังมีความจำเป็นเพื่อยืนยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ของเทคนิค FDS เมื่อใช้กับฉนวนเอสเทอร์ธรรมชาติในหม้อแปลงไฟฟ้า

ดัชนีประเมินสุขภาพเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินสภาพและความสมบูรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบและการตรวจสอบหลายด้าน เช่น ความชื้นในฉนวนแข็ง คุณสมบัติของฉนวนเหลว การทดสอบทางไฟฟ้า และการตรวจสอบภายนอก ดัชนีนี้ช่วยให้วิศวกรและผู้ดูแลระบบสามารถประเมินสถานะของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ

ข้อดีของการประเมินอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

- การวางแผนการบำรุงรักษาที่เหมาะสม: การประเมินอายุที่เหลืออยู่ช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาที่เหมาะสมและทันสมัย โดยการระบุความต้องการในการบำรุงรักษาและการสำรวจสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า
- การเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการทรัพยากร: ทรัพยากรที่มีจำกัด เช่น งบประมาณและเวลาทำงาน สามารถใช้ให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพได้มากขึ้น เนื่องจากสามารถกำหนดลำดับความสำคัญของการดำเนินการได้ตรงจุด
- การลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหาย: การประเมินอายุที่เหลืออยู่ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายที่ไม่คาดคิด โดยทำให้สามารถระบุปัญหาและแก้ไขได้อย่างทัน่วงที
- การลงทุนอย่างมีประสิทธิภาพ: ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสามารถวางแผนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นไปที่หม้อแปลงที่มีความสำคัญและต้องการการดูแลเร่งด่วน

การประเมินอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการบำรุงรักษาและการจัดการรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ช่วยเพิ่มความมั่นคงและประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเพอร์สโอบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาณความชื้นในกระดาษด้วยวิธีการไทเทรต และจากการทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ของเพอร์สโอบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติและน้ำมันแร่
3. เพื่อจัดทำดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการพัฒนาโมเดลจากงานวิจัยอื่น มาปรับให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีอยู่

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของเพอร์สโอบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยฉนวนเหลว 2 ชนิดคือ น้ำมันแร่ และน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ ที่ผ่านการอิมเพรกเนตในเวลาที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นจะถูกทำให้เสื่อมสภาพภายใต้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 0, 30, และ 90 วันตามลำดับตัวอย่างที่ถูกอิมเพรกในด้วยน้ำมัน จะถูกทดสอบหาปริมาณความชื้นด้วยวิธีการไทเทรต เทคนิค Coulometric Karl Fisher เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ และศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเพอร์สโอบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติ
2. จัดทำดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า จากผลการทดสอบทางไฟฟ้า และผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมัน ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีอยู่และสะท้อนถึงสภาพของหม้อแปลงในปัจจุบันได้ โดยอ้างอิงจากโมเดล Kinetics
3. จัดทำการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการคำนวณระดับ DP ในแต่ละปีจากตัวแทนข้อมูลอุณหภูมิขดลวดที่ถูกเลือก โดยใช้ข้อมูลผลการวิเคราะห์แก๊สในน้ำมันและปริมาณความชื้นในกระดาษเพื่อเป็นข้อมูลอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 สมมติฐานของการศึกษา

การทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ของเพอร์สบอร์ดที่ผ่านการเสื่อมสภาพซึ่งมีปริมาณความชื้นที่ต่างกัน ผลการทดสอบจะสามารถคำนวณปริมาณความชื้นในกระดาษได้ตรงกับวิธีการไทเทรตด้วยเทคนิค Coulometric Karl Fisher ทั้งในเพอร์สบอร์ดที่อิมเพกเนตด้วยน้ำมันแร่ และเอสเทอร์ธรรมชาติ

ผลการของดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า และการประเมินอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงมีความสอดคล้องกัน และสะท้อนถึงสภาวะปัจจุบันของหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2567				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	●	●	●							
2. ศึกษาข้อมูลการทดสอบ FDS	●	●	●	●	●					
3. ออกแบบการทดลองและเตรียมเครื่องมือการทดสอบ	●	●								
5. จำลองกรณีศึกษาของเพอร์สบอร์ด	●	●	●							
6. ทดสอบเพอร์สบอร์ดที่จำลองกรณีศึกษาตามระยะเวลาที่กำหนด	●	●	●							
7. ตรวจสอบข้อมูลและทดสอบซ้ำ		●								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2567				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
8. วิเคราะห์และสรุปผล การทดลอง		●	●				●	●		
9. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ ดัชนีสุขภาพและการ ประเมินอายุของหม้อ แปลง					●	●	●	●	●	
10. ศึกษาข้อมูลที่ได้รับ จากการทดสอบ						●	●	●	●	
10. จัดทำดัชนีและการ ประเมินอายุ					●	●	●	●	●	●
11. จัดทำวิทยานิพนธ์							●	●	●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

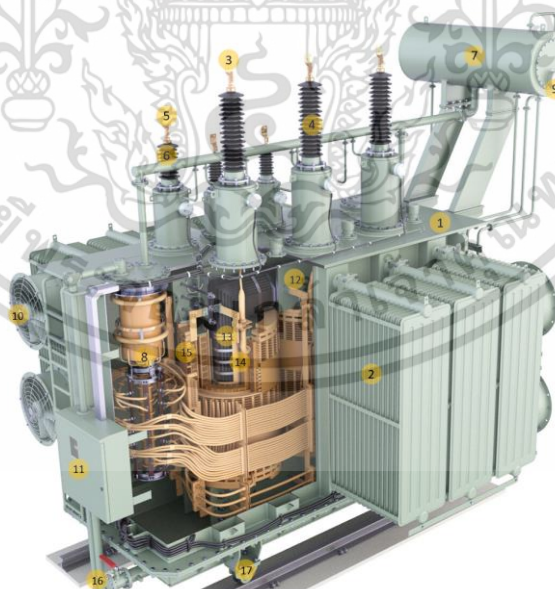
ในบทนี้อธิบายถึงระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ ฉนวนเหลวและฉนวนแข็ง รวมถึงการทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ และข้อมูลเกี่ยวกับการจัดทำดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเพราะหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง อาจสูงขึ้น ต่ำลง หรือแรงดันอาจเท่าเดิม การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่อยู่ใตีสานแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

##### 2.1.1 ส่วนประกอบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย แกนเหล็ก เป็นทางเดินของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กและมีขดลวดสองชุด ชุดหนึ่งเป็นด้านป้อนแรงดันเข้า อีกชุดหนึ่งเป็นด้านจ่ายแรงดันออก พันอยู่บนแกนเหล็กตั้ง นอกจากแกนเหล็กและขดลวด มีฉนวนซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกชนิด



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงชื่อของส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละส่วน

หมายเลข	ชื่อ (ไทย)	ชื่อ (อังกฤษ)
1	ตัวถัง	Tank Housing
2	ครีประบายความร้อน	Corrugated Fin
3	ขั้วต่อสายแรงสูง	High Voltage Terminal
4	ลูกถ้วยแรงสูง	High Voltage Bushing
5	ขั้วต่อสายแรงต่ำ	Low Voltage Terminal
6	ลูกถ้วยแรงต่ำ	Low Voltage Bushing
7	แทงก์รองรับน้ำมัน	Conservator Tank
8	แท็ปปรับแรงดัน	On-Load Tap Changer
9	เกจวัดระดับน้ำมัน	Oil Level Gauge
10	พัดลมระบายความร้อน	Cooling Fans
11	แผงควบคุมแท็ปปรับแรงดัน	Tap-changer Control Panel
12	แคลมป์	Clamp
13	แกนเหล็ก	Core
14	ขดลวดแรงต่ำ	Low Voltage Winding
15	ขดลวดแรงสูง	High Voltage Winding
16	วาล์วระบาย	Drain Valve
17	ฐานหม้อแปลง	Transformer Base

### 2.1.2 หน้าที่ของส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า

1. ตัวถังหม้อแปลง (Transformer Tank): ตัวถังหม้อแปลงมีหน้าที่หลักคือ หม้อหุ้มส่วนประกอบภายในหม้อแปลงทั้งหมด ได้แก่ ขดขดลวด แกนเหล็ก และฉนวนน้ำมัน รวมทั้งรับแรงทางกล เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหม้อแปลงชนิดต่าง ๆ เช่น ลูกถ้วย ตู้ควบคุม แท็ปปรับแรงดัน
2. ครีประบายความร้อน (Corrugated Fin): เป็นส่วนหนึ่งของตัวถัง มีส่วนช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวถังหม้อแปลงกับอากาศภายนอก เพื่อใช้ในการระบายความร้อนของหม้อแปลง
3. ขั้วต่อสายแรงสูง-แรงต่ำ (High Voltage Terminal): เป็นตัวเชื่อมต่อสายไฟผ่านลูกถ้วยหม้อแปลงออกไปใช้หรือรับเข้ามาจากฝั่งไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ลูกถ้วยแรงสูง-แรงต่ำ (High Voltage Bushing): ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างขั้วตัวนำฝั่งแรงดันสูงกับตัวถังของหม้อแปลง
5. ขั้วต่อสาย แรงต่ำ (Low Voltage Terminal): เป็นตัวเชื่อมต่อสายไฟผ่านลูกถ้วยหม้อแปลงออกไปใช้หรือรับเข้ามาจากฝั่งไฟฟ้าแรงต่ำ
6. ลูกถ้วยแรงสูง-แรงต่ำ (Low Voltage Bushing): ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างขั้วตัวนำฝั่งแรงดันต่ำกับตัวถังของหม้อแปลง
7. แทง์รองรับน้ำมัน (Conservator Tank): อยู่เหนือถังหม้อแปลง มีหน้าที่สำรองน้ำมันในถังสามารถลดหรือเพิ่มจากการขยายตัวของน้ำมันในหม้อแปลง เพื่อให้หม้อแปลงเต็มตลอดเวลา โดยทั่วไปจะมีปริมาตร 10% ของน้ำมันในหม้อแปลง
8. แทปปรับแรงดัน (On-Load Tap Changer): เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเพิ่มหรือลดอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง เพื่อรักษาระดับแรงดันด้านขาออกให้คงที่แบบอัตโนมัติ โดยจะมีมอเตอร์ในการทำงาน ซึ่งจะมีเฉพาะในหม้อแปลงกำลังเท่านั้น
9. เกจวัดระดับน้ำมัน (Oil Level Indicator): เป็นตัวแสดงระดับน้ำมันภายในตัวถังหม้อแปลงจะมีทั้งแบบ With Contact และ With-Out Contact
10. พัดลมระบายความร้อน (Cooling Fans): ทำงานร่วมกับครีบบระบายความร้อน ทำหน้าที่ทำให้อากาศบริเวณครีบบระบายความร้อน หมุนเวียนกับหน้าสัมผัสมากขึ้น ช่วยให้เกิดการระบายความร้อนที่เร็วขึ้น
11. แผงควบคุมแทปปรับแรงดัน (Tap-changer Control Panel): แสดงระดับอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงของ On-Load แทปปรับแรงดัน และทำหน้าที่ควบคุมการปิด-เปิดการทำงานอื่นร่วมด้วย
12. แคลมป์แกนเหล็ก (Core Clamp): มีหน้าที่ยึดแกนเหล็กเพื่อไม่ให้มีจุดที่สัมผัสกัน ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและการเกิดอาร์ค และยังช่วยป้องกันความเสียหายทางกล
13. แกนเหล็ก (Core): แกนเหล็กทำหน้าที่เป็นเส้นทางไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก
14. ขดลวดแรงต่ำ (Low Voltage Winding): ทำหน้าที่ให้กระแสไหล โดยขดลวดแรงดันต่ำจะอยู่ด้านในชิดกับแกนเหล็ก ขดลวดตัวนำที่นิยมใช้ในหม้อแปลงคือตัวนำทรงเหลี่ยม เนื่องจากใช้พื้นที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด
15. ขดลวดแรงสูง (High Voltage Winding): ทำหน้าที่ให้กระแสไหล โดยขดลวดแรงดันต่ำจะอยู่ด้านนอกหุ้มขดลวดแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. วาล์วระบาย (Drain Valve): เป็นวาล์วเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหม้อแปลงออกจากหม้อแปลง หรือเป็นวาล์วเปิดเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำมันทดสอบ
17. ฐานหม้อแปลง (Transformer Base): รองรับตั้งถังหม้อแปลงทั้งหมด

### 2.1.3 ระบบฉนวนของหม้อแปลง

ระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฉนวนเหลวหรือน้ำมันหม้อแปลง และฉนวนแข็ง โดยที่ฉนวนทั้งสองนี้จะทำหน้าที่เป็นฉนวนร่วมกัน

#### ฉนวนเหลว [3]

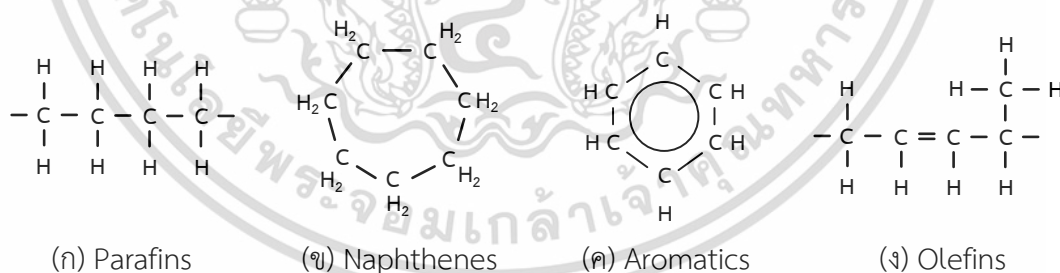
ฉนวนเหลวที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด แต่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ ฉนวนเหลวอินทรีย์ และ ฉนวนเหลวนินทรีย์ ฉนวนเหลวอินทรีย์ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ฉนวนเหลวอินทรีย์ได้มาจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น น้ำมันแร่, น้ำมันพืช, เอสเตอร์ธรรมชาติ ฯลฯ หรือกระบวนการสังเคราะห์ เช่น เอสเตอร์สังเคราะห์, ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ ฯลฯ ฉนวนเหลวนินทรีย์เกิดจากกระบวนการผลิต เช่น ไนโตรเจน น้ำบริสุทธิ์ ฯลฯ

#### 1. น้ำมันหม้อแปลงหรือน้ำมันแร่ (Mineral oil)

น้ำมันหม้อแปลงมีหน้าที่ในการระบายความร้อนของหม้อแปลง และเป็นฉนวนเชื่อมทั้งหม้อแปลง ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นหลัก เชื่อมโยงด้วยซัลเฟอร์ ออกซิเจน หรือโลหะบางชนิด ประกอบเป็นโครงสร้างพื้นฐาน คือ พาราฟินิก (Paraffinic) แนฟทีนิก (Naphthenic) และอโรมาติก (Aromatic) ส่วนประกอบของน้ำมันแร่แสดงในรูปที่ 2.2 ลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำมันหม้อแปลง จะกำหนดด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมี และไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ แสดงใน

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์เคมี และไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง [4]

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางไฟฟ้า
- สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน - อุณหภูมิที่ติดไฟทันที (Auto-Ignition Temperature) - ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) - สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) - ความหนาแน่น(Density) - จุดติดไฟ (Fire Point) - จุดวาบไฟ (Flash Point) - จุดไหลเท (Pour Point) - ดัชนีการหักเหของแสง (Reference Index) - ความดันไอ (Vapor Pressure) - ความหนืด (Viscosity)	- แรงตึงผิว (Interfacial) - การปนเปื้อน (Contaminants) - โครงสร้างโมเลกุล - ค่าความเป็นกลาง - ค่าสaponification (Saponification Value) - ค่าความเสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal Stability) - ความชื้น (Water Content) - ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen Content) - ความคงทนต่อการเกิดออกซิเดชัน - อัตราส่วนปริมาตรของ พาราฟินิก แนฟทีนิก และโอโรมาติก	- ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Breakdown Strength) - ค่าเปอร์มิติวิตี (Permittivity) - ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า - ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ - ค่าแฟกเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Dissipation Factor) - ดิสชาร์จบางส่วน และแรงดันเริ่มต้นการดิสชาร์จบางส่วน

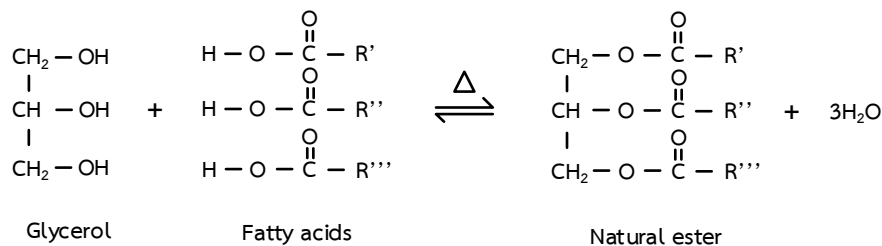


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของส่วนประกอบพื้นฐานของน้ำมันแร่ [3]

## 2. เอสเตอร์ธรรมชาติ

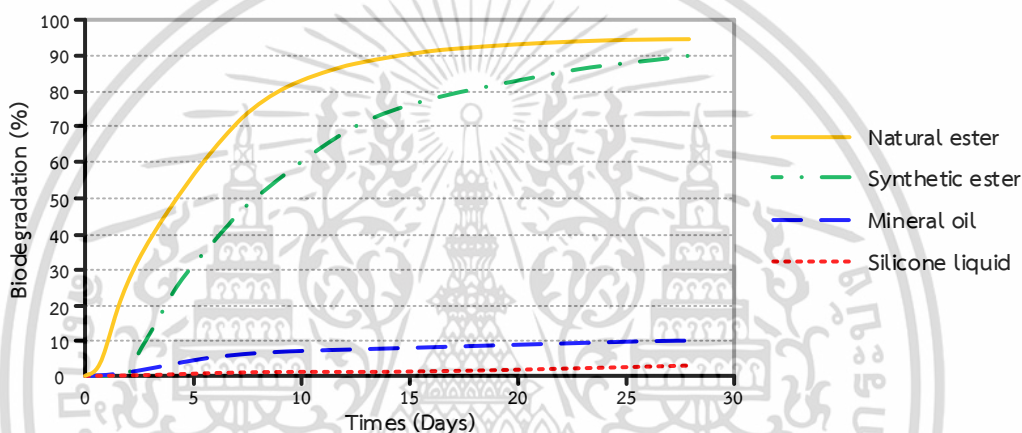
เอสเตอร์ธรรมชาติเป็นตัวเลือกหนึ่งของฉนวนทางเลือก ที่จะเข้ามาแทนที่น้ำมันแร่ในอนาคต มีความสามารถในการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีจุดติดไฟ จุดวาบไฟที่สูงกว่าน้ำมันแร่ แต่เอสเตอร์ธรรมชาติมีจุดด้อยในด้านความหนืด การเกิดออกซิเดชัน จุดไหลเท ที่ต่ำกว่าน้ำมันแร่ โครงสร้างทางเคมีของเอสเตอร์ธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอสเตอร์ธรรมชาติ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



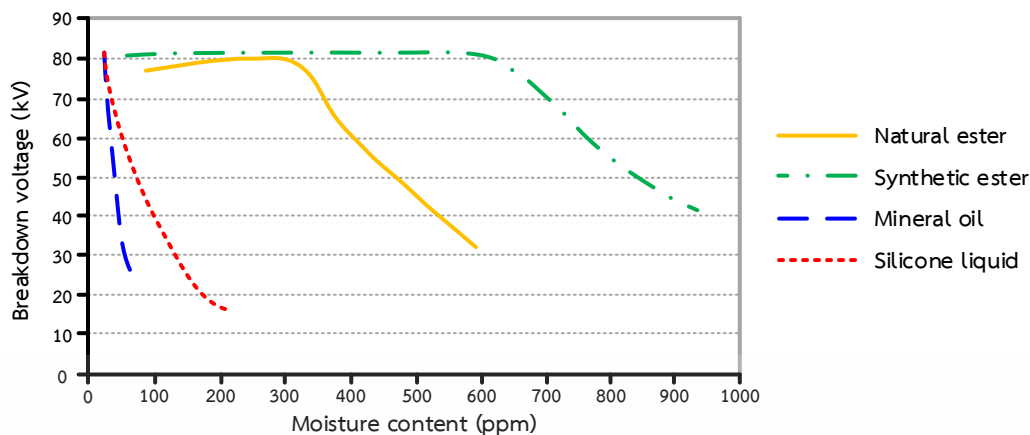
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเอสเทอร์ธรรมชาติ [5]

เอสเทอร์ธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติสูงถึง 90% ภายในระยะเวลา 28 วัน ขณะที่น้ำมันแร่ย่อยสลายได้เพียง 10% เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายตามธรรมชาติของฉนวนเหลวชนิดต่าง ๆ [6]

ปริมาณความชื้นที่มากขึ้นส่งผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ของเอสเทอร์ธรรมชาติลดลง เมื่อมีค่าความชื้นสูงขึ้นจนมีค่าประมาณ 350 ppm ในขณะที่น้ำมันแร่จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ลดลงเมื่อค่าความชื้นสูงขึ้นจนมีค่าประมาณ 25 ppm แสดงดังรูปที่ 2.5 ทั้งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของเอสเทอร์ธรรมชาติมีขั้ว จึงทำให้มีลักษณะคล้ายแม่เหล็กดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้ดี ขณะที่น้ำมันแร่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เอสเทอร์ธรรมชาติมีจุดอิ่มตัวของน้ำสูงถึง 1100 ppm ขณะที่น้ำมันแร่มีจุดอิ่มตัวของน้ำเพียง 55 ppm ที่อุณหภูมิ 23°C



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์และค่าความชื้นของฉนวนเหลวชนิดต่าง ๆ [6]

### ฉนวนแข็ง [7]

ฉนวนแข็งเมื่อเกิดความเสียหายจากความเครียดทางสนามไฟฟ้า ความร้อน หรือความเครียดทางกล จะไม่สามารถคืนสภาพความเป็นฉนวนได้เหมือนกับฉนวนที่เป็นของเหลวหรือฉนวนที่เป็นดั่งนั้นฉนวนที่เป็นของแข็งต้องมีความทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ทนต่อความเครียดทางกล ทนต่อความร้อน และมีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ โดยฉนวนแข็งสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทตามโครงสร้างเคมีดังนี้

1. ฉนวนแข็งที่เป็นอินทรีย์ เช่น กระดาษ, ยาง, เรซิน ฯลฯ
2. ฉนวนแข็งที่เป็นอนินทรีย์ เช่น เซรามิก, ไมกา, แก้ว ฯลฯ
3. ฉนวนแข็งที่เป็นโพลิเมอร์ เช่น Polyvinyl Chloride (PVC), epoxy, Polyethylene (PE) ฯลฯ

ฉนวนแข็งที่นำมาใช้งานในหม้อแปลงคือกระดาษแบ่งออกเป็นกระดาษบาง (Paper) และกระดาษอัดแรงดัน (Board) แสดงในรูปรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปกระดาษบางจะมีความหนาน้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตร ส่วนกระดาษอัดแรงดันจะมีความหนามากกว่า 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งกระดาษที่ใช้เป็นฉนวนรู้จักกันในชื่อกระดาษคราฟท์ (Kraft paper) กระดาษที่มีความหนาต่างกันจะนำไปใช้งานต่างกัน กระดาษความหนาแน่นต่ำ ( $0.8 \text{ g/cm}^3$ ) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุความถี่สูง และฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุของไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในตัวเก็บประจุที่มีขั้วเพื่อเก็บพลังงานและมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 ฉนวนแข็ง (ก) กระดาษอัดแรงดัน (เพอร์สบอร์ด) (ข) กระดาษคราฟท์ [8]

การใช้กระดาษเป็นฉนวนต้องนำกระดาษชุบฉนวนเหลว ซึ่งจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระดาษ ชุบฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระดาษและค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของฉนวนเหลว และค่าความหนาแน่นของกระดาษซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสามารถคำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระดาษคราฟท์และ paper polypropylene paper (PPP) ชุบฉนวนน้ำมันแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระดาษชุบน้ำมันฉนวนที่ 20 องศาเซลเซียส ( $\epsilon_{res}$ ) [4]

ฉนวนเหลวที่ใช้ชุบ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นของกระดาษชุบฉนวนเหลว ( $\epsilon_{res}$ )		
	0.8 g/cm <sup>3</sup>	1 g/cm <sup>3</sup>	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Trichlorobiphenyl $\epsilon_r = 6.1$	6.28	6.3	6.4
Pentachlorobiphenyl	5.71	5.88	6.06
Transformer oil	3.26	3.72	4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนผสม (กระดาษและน้ำมัน) [4]

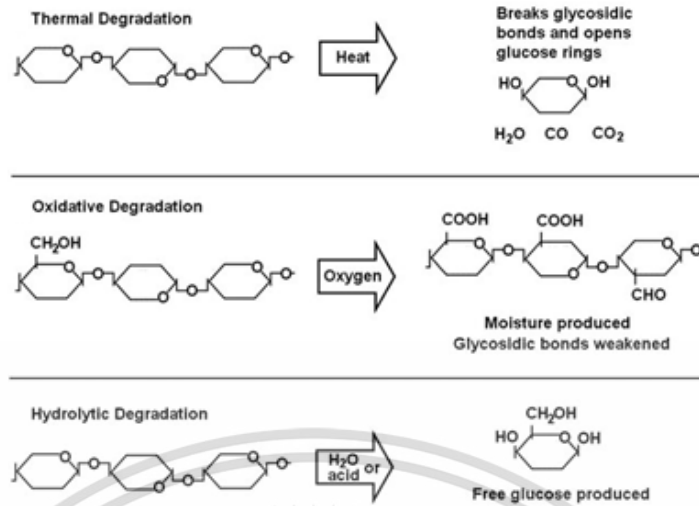
Type	Impregnating liquid	Average voltage stress (kV cm <sup>-1</sup> )	Tan δ at room temperature	Tan δ at operating temperature
Kraft paper	Mineral oil	180	3.8x10 <sup>-3</sup> at 23°C	5.7x10 <sup>-3</sup> at 85°C
Kraft paper	Silicone liquid	180	2.7x10 <sup>-3</sup> at 23°C	3.1x10 <sup>-3</sup> at 85°C
Paper polypropylene-paper (paper)	Dodecyl benzene	180	9.8x10 <sup>-4</sup> at 18°C	9.9x10 <sup>-4</sup> at 100°C
Kraft paper	Polybutens	180	2.0x10 <sup>-3</sup> at 25°C	2.0x10 <sup>-3</sup> at 25°C

#### การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ

ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการทางเคมีที่เร่งปฏิกิริยาในการสลายพันธะขึ้นอยู่กับกรดคาร์บอกซิลิกที่แยกตัวออกจากน้ำ เนื่องจากน้ำและกรดคาร์บอกซิลิกเกิดขึ้นจากกระบวนการเสื่อมสภาพของเซลลูโลสและเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ หรือเกิดจากน้ำภายนอกที่รั่วเข้าไปภายใน

ออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งมีออกซิเจนทำปฏิกิริยากับพันธะคู่คาร์บอนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสำหรับฉนวนกระดาษ ซึ่งออกซิเจนเกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และออร์แกนิกไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ROOH) หรือออกซิเจนภายนอกที่รั่วเข้าไปภายใน

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เกิดจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากเซลลูโลสได้รับอุณหภูมิสูงเกินขีดใช้งาน โดยไม่ต้องมีสารตั้งต้นและการเสื่อมสภาพจะทำให้เกิดการสลายพันธะเซลลูโลสบางส่วน จากนั้นจะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สารประกอบฟูราน และน้ำ จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและออกซิเดชันได้อีกด้วยซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเซลลูโลสและการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส [7]

## 2.2 ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ (FDS) [9]

การวัดการตอบสนองของไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับอย่างดีในการศึกษาพฤติกรรมโพลาริเซชันของระบบฉนวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดจากส่วนผสมที่ซับซ้อนของวัสดุฉนวน ในเทคนิคนี้ กลไกโพลาริเซชันในระบบฉนวนจะได้รับการศึกษาโดยการวัดขนาดและเฟสของกระแสเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแรงดันกระแสสลับ โดยทั่วไป ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า การวัด FDS จะดำเนินการระหว่าง 0.1 mHz ถึง 1 kHz เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถวัดค่าความจุที่ขึ้นกับความถี่ การนำไฟฟ้า และการสูญเสียแทนเจนต์ของระบบฉนวน ซึ่งสามารถใช้ประเมินค่าความชื้นเฉลี่ยและค่าการนำไฟฟ้าของฉนวนผ่านเทคนิคการสร้างแบบจำลองต่างๆ ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเทคนิคนี้คือการวัดมักจะดำเนินการที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากการลดสัญญาณรบกวนทำได้ค่อนข้างง่ายกว่าในการวัดแถบความถี่แคบ

### ทฤษฎีของการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

Frequency Domain Spectroscopy (FDS) เป็นเทคนิคแบบไม่ทำลายเพื่อประเมินสภาพของฉนวน ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวน แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกจ่ายไปที่ฉนวน จากนั้นจึงวัดกระแสผ่านฉนวนอย่างแม่นยำและวิเคราะห์ความแตกต่างของเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $\bar{U}(\omega)$  และกระแส  $\bar{I}(\omega)$  ภายในช่วงความถี่ที่วัดได้ ความต้านทานของฉนวนสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\bar{Z}(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \bar{U}(\omega) / \bar{I}(\omega) \quad (2-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของความจุเชิงซ้อนได้

$$\bar{I}(\omega) = j\omega\bar{C}(\omega)\bar{U}(\omega) \quad (2-2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความจุเชิงซ้อนและการอนุญาตเชิงซ้อนสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\bar{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \frac{\bar{C}(\omega)}{C_0} \quad (2-3)$$

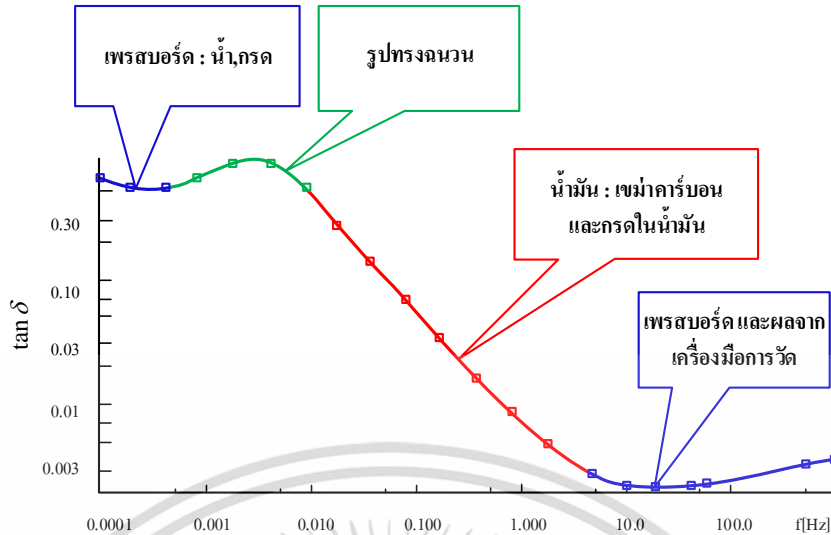
โดยที่  $C_0$  คือความจุทางเรขาคณิตของฉนวนในโดเมนความถี่ซึ่งสามารถเขียนในรูปของปัจจัยการกระจายอีเล็กทริก ( $\tan \delta$ ) ได้เป็น

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (2-4)$$

สมการ 2-4 แสดงให้เห็นว่าส่วนที่แท้จริงของสภาพอนุญาตที่ซับซ้อนแสดงถึงโพลาริเซชันของฉนวน ในขณะที่องค์ประกอบที่สูญเสียแสดงโดยส่วนจินตภาพ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีบทบาทสำคัญในการโพลาริเซชันเป็นไดโพลที่มีขั้วสูง FDS เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการประเมินฉนวนหม้อแปลงเนื่องจากมีความไวต่อความชื้น

#### ปัจจัยการกระจาย ( $\tan \delta$ ) [9]

พลังงานที่สูญเสียไปเมื่อฉนวนเซลลูโลสสัมผัสกับสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกประเมินโดยปัจจัยการกระจาย ซึ่งได้รับเมื่อปริมาณความชื้นของฉนวนเพิ่มขึ้น ภายในฉนวน พลังงานจะถูกถ่ายโอนเป็นความร้อน ค่าปัจจัยการกระจายต่ำบ่งชี้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้เพียงเล็กน้อยจะสูญเสียไปเนื่องจากฉนวน เนื่องจากมีความเปราะบางต่อมลพิษที่เป็นไอออนิก ส่วนประกอบนี้แสดงถึงการย่อยสลายและการปนเปื้อนของฉนวนการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าสะท้อนถึงการตอบสนองของไดอิเล็กทริกของน้ำมัน กระดาษ และรูปทรงของฉนวน มีอิทธิพลเหนือการตอบสนองทั้งหมดที่ความถี่ต่างกัน อิทธิพลเด่นของเพอร์สบอร์ด น้ำมัน และรูปทรงที่ความถี่ต่าง ๆ ต่อการตอบสนองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความหลากหลายของปัจจัยการสูญเสียของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าเทียบกับความถี่

ดังรูปช่วงความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz ส่วนใหญ่มีอิทธิพลจากสภาพฉนวนที่เป็นของแข็งในและมีอิทธิพลเพิ่มเติมจากการเหนี่ยวนำของขดลวด สายวัด เส้นเคเบิลความถี่ 0.01–1 Hz มีสาเหตุหลักมาจากการนำไฟฟ้าของน้ำมัน ซึ่งเกิดจากผลผลิตจากการเสื่อมสภาพที่ละลายในน้ำมันเช่น เขม่า และกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันและส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองบริเวณนี้ รูปทรงของฉนวน (อัตราส่วนของน้ำมันต่อเพอร์สบอร์ด) เป็นตัวกำหนดค่าสูงสุดในพื้นที่หรือ “โหนด” ที่มองเห็นได้ที่ความถี่ต่ำยิ่งอัตราส่วนของน้ำมันต่อเพอร์สบอร์ดสูงเท่าไร “โหนด” ก็ยิ่งมีอิทธิพลมากขึ้นเท่านั้น คุณสมบัติของเซลล์โอสจะปรากฏอีกครั้งที่ความถี่ประมาณ 1 mHz ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณความชื้น กระบวนการผลิตและการมีกรดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

**ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกรวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่บนหม้อแปลงไฟฟ้า [10]**

นอกเหนือจากสภาพความเป็นฉนวนภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า ยังมีปัจจัยภายในและภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่อกรวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ซึ่งอาจนำไปสู่การตีความสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผิด ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดผลกระทบของปัจจัยเหล่านั้นให้เหลือน้อยที่สุดหรือแนะนำการปรับเทียบที่เหมาะสมหลังจากศึกษาระบบการวัดโดยรวมอย่างรอบคอบ

**1) การเปลี่ยนแปลงด้านอุณหภูมิ**

การตอบสนองไดอิเล็กทริกนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก ดังนั้นควรทราบอุณหภูมิที่ถูกต้องของการวัดเพื่อผลทดสอบที่น่าเชื่อถือ ในกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ยิ่งไปกว่านั้นอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะโหลดและอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเมื่อเลิกใช้งาน เนื่องจากเวลาที่จำกัดในการหยุดการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า (Shutdown)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบจริงในภาคสนาม ในกรณีส่วนใหญ่จะไม่สามารถรองานว่าอุณหภูมิจะถึงสภาวะคงที่ก่อนที่จะเริ่มการทดสอบผลตอบแทนไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่มักจะเริ่มต้นทดสอบที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิจะลดลงอย่างช้าในระหว่างการวัด อัตราการลดลงของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มต้นปัจจัยภายใน เช่น ความจุความร้อนของฉนวน และปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิแวดล้อมในสภาพแวดล้อมเขตร้อนอุณหภูมิจะลดลง 2-3 องศา แต่อาจสูงถึง 15 องศาเซลเซียสในสภาพอากาศหนาวเย็นผลกระทบนี้ได้รับการศึกษาในการอ้างอิงและแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นเด่นชัดที่ความถี่ต่ำกว่า 1 Hz

## 2) กระแสรั่วไหล

โดยทั่วไปแนะนำให้แยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกจากระบบอย่างสมบูรณ์สำหรับการวัดผลตอบแทนไดอิเล็กทริก ทริกในโดเมนความถี่ ซึ่งจะช่วยลดเส้นทางกระแสไฟรั่วที่ไม่จำเป็นและการโอเวอร์โวลตของแหล่งเครื่องมือวัดผ่านสเตรย์คาปาซิแตนซ์ ในบางกรณีไม่สามารถแยกหม้อแปลงไฟฟ้าออกมาได้อย่างสมบูรณ์ และจะตัดการเชื่อมต่อจากระบบโดยใช้ไอโซเลเตอร์เท่านั้น ดังนั้นสายเคเบิลและตัวแยกสัญญาณจึงยังคงเชื่อมต่อกับขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์เพิ่มเติมเหล่านี้เพิ่มสเตรย์คาปาซิแตนซ์ ทำให้เส้นทางการรั่วไหลเพิ่มเติม ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการวัดผลตอบแทนไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ได้

## การตีความผลการทดสอบ [7]

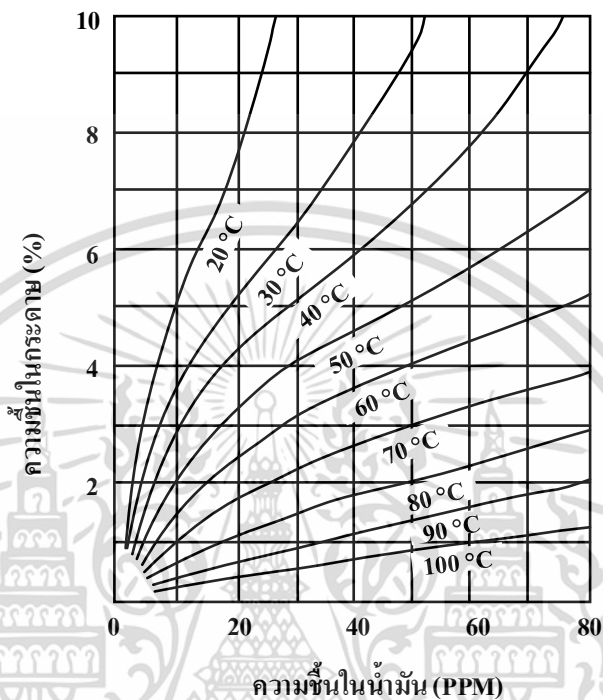
ตามที่ระบุในส่วนก่อนหน้านี้ ผลลัพธ์ของผลตอบแทนไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์หลายปัจจัยรวมถึงสภาพของน้ำมันและกระดาษหรือเพอร์สบอร์ด การมีกรด สิ่งเจือปน และปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับอายุ ความชื้น เนื้อหา อุณหภูมิ และโครงสร้างของฉนวน โดยหลักการควรจะคำนวณการตอบสนองโดยรวมของไดอิเล็กทริกเซลล์โลสซึ่งจากการตอบสนองที่วัดได้ของหม้อแปลงไฟฟ้า และทราบค่าความชื้นโดยเฉลี่ยในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความถี่ แต่จากหัวข้อก่อนหน้านี้ทั้งส่วนเพอร์สบอร์ด น้ำมัน และกรด มีอิทธิพลอื่น มากมายที่มีผลต่อค่าความชื้น ทำให้ยากจะแยกแยะวิเคราะห์และตีความ ปัจจัยต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อคุณภาพของการแปลผลของเพอร์สบอร์ด เช่น ประเภทของวัสดุ น้ำมัน ปริมาณกรดและประเภทหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น สิ่งสำคัญคือต้องตระหนักถึงข้อผิดพลาดเหล่านี้และนำมาพิจารณาในการประเมินคุณภาพฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าอิทธิพลของข้อผิดพลาดที่แตกต่างกัน

### 1) ผลกระทบของความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของกระดาษ ดังนั้นในการประเมินสภาพของระบบกระดาษน้ำมัน เช่น ในหม้อแปลงไฟฟ้า จึงมีความจำเป็นต้องระบุปริมาณความชื้นในฉนวนกระดาษให้ได้ การเก็บตัวอย่างกระดาษจากหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการทดสอบโดยทั่วไปไม่สามารถทำได้สำหรับการทดสอบภาคสนาม การวัดความชื้นสัมบูรณ์ของตัวอย่างน้ำมันในหน่วย ppm เช่น ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการไทเทรตแบบด้วยเทคนิค Karl Fischer โดยทั่วไปจะไม่สามารถให้ข้อมูลที่สรุปได้ เนื่องจากความชื้นสมดุลของน้ำมันและกระดาษจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอาจใช้เวลานานในการรอให้เสถียรโดยความสัมพันธ์ระหว่างฉนวนเหลวและฉนวนแข็งเป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เส้นโค้ง Fabre-Pichon สำหรับการกระจายความชื้นในกระดาษกราฟและน้ำมัน

## 2) ผลกระทบจากการเสื่อมสภาพ

ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่บ่งบอกสถานะของฉนวนคือ สถานะการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจทำให้ค่าระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ของฉนวนแข็งลดลง ความชื้นและกรด การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ ปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้ล้วนมีอิทธิพลต่อผลการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ การศึกษาในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ได้ยืนยันว่าการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า และผลผลิตที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ เช่น กรดโมเลกุลต่ำ มีผลกระทบต่อการตอบสนองของไดอิเล็กทริก ผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการเหล่านั้นยังรวมอยู่ในซอฟต์แวร์ประเมินความชื้นเพื่อประเมินความชื้นในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งภาคสนาม

## 3) ผลของกรด

ระหว่างการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าการเสื่อมสภาพของทั้งกระดาษและน้ำมันมีอิทธิพลมาจากหลายปัจจัย รวมทั้งการเกิดออกซิเดชันที่ถูกเร่งปฏิกิริยาจากอุณหภูมิขณะทำงาน อากาศ และความชื้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและเซลลูโลสทำให้เกิดกรดเปอร์ออกไซด์ และน้ำ มีกรดสองชนิดหลักที่พบในฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเสื่อมสภาพ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรดไฮโดรฟลิค เช่น กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติกจากการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส และ
- กรดไฮโดรฟอบิก เช่น กรดแนฟเทนิคและกรดสเตียริกจากการออกซิเดชันของน้ำมันฉนวน

กรดคาร์บอกซิลิกหลายชนิดเกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของเซลลูโลสและน้ำมัน อายุที่มากขึ้นของเซลลูโลสส่วนใหญ่จะสร้างกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งละลายน้ำได้ ในขณะที่อายุที่มากขึ้นของน้ำมันจะสร้างกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งส่วนใหญ่จะละลายในน้ำมัน เมื่อสร้างแบบจำลองการตอบสนอง ผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ ควรคำนึงถึงผลกระทบของกรดสำหรับทั้งน้ำมันและเซลลูโลส โดยผลกระทบหลักของกรดในน้ำมันคือการเพิ่มความนำไฟฟ้า ผลของกรดในเซลลูโลสทำให้มีการเติมโมเลกุลที่มีขั้วซึ่งมีผลต่อการตอบสนองของไดอิเล็กทริกของทั้งกระดาษและเพรสบอร์ด โดยกรด "สายสั้น" ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (กรดไฮโดรฟลิค) ประกอบด้วยกรดฟอร์มิกและกรดอะซิติกสามารถละลายน้ำได้และอยู่ในกระดาษและมีส่วนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ในทางตรงกันข้ามกรด "สายยาว" ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (กรดไฮโดรฟอบิก) ซึ่งประกอบด้วยกรดแนฟเทนิคและสเตียริกจะละลายในไขมันและอยู่ในน้ำมัน กรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีปฏิกิริยามากกว่ากรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อกรดแทรกซึมเข้าไปในกระดาษ กรดจะสนับสนุนปฏิกิริยาการย่อยสลาย และส่งผลให้สูญเสียความต้านทานแรงดึงของพอลิเอไมด์เรซิน

#### 4) ผลกระทบของอุณหภูมิ

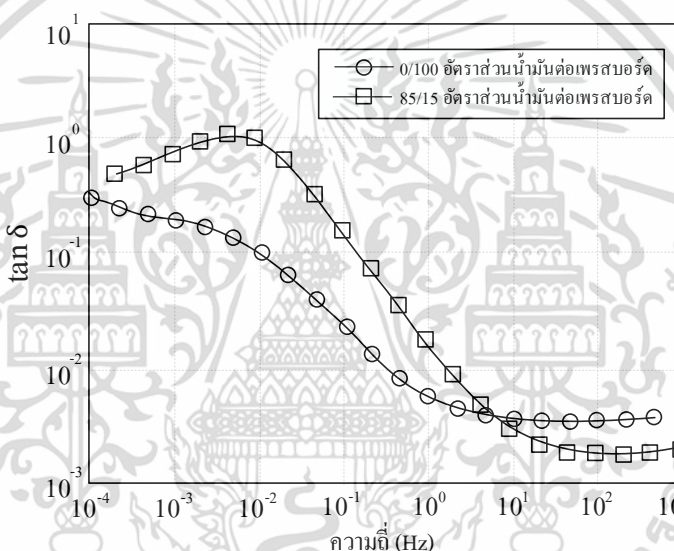
อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการตอบสนองไดอิเล็กทริกของระบบฉนวน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มการนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้สองวิธี เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของพาหะของประจุหรือเนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถนำไปสู่การแตกตัวเป็นไอออนด้วยความร้อนของโมเลกุล ทำให้จำนวนพาหะของประจุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นยังรบกวนสมดุลความชื้นในน้ำมันและกระดาษ สิ่งเหล่านี้มีส่วนทำให้อุณหภูมิมีผลต่อการตอบสนองของผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่

รูปร่างทั่วไปของผลตอบสนองตัวประกอบการสูญเสียของเพรสบอร์ดชุบน้ำมันที่อุณหภูมิขึ้นอยู่กับปัจจัยสองประการ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันและความต้านทานฉนวนของเพรสบอร์ด ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่และความหนาแน่นของไอออนในน้ำมัน ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของสิ่งเจือปนทางไฟฟ้าที่มีอยู่ในน้ำมัน ที่อุณหภูมิสูงขึ้น การไหล และการแยกตัวของสิ่งเจือปนทางไฟฟ้ากับไอออนจะเพิ่มขึ้น นำไปสู่การเพิ่มขึ้นในการนำไฟฟ้าพร้อมกับอุณหภูมิ

ในทางตรงกันข้าม การนำไฟฟ้าในกระดาษขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเพรสบอร์ดเป็นหลัก ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โพลาริเซชันและการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลกระทบซ้อนทับสองอย่าง คือ ความหนาแน่นของพาหะของประจุเพิ่มขึ้น และการเคลื่อนที่ของพาหะประจุในฉนวนเพรสบอร์ดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสั้นระยะทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นของตัวพาหะประจุ

5) ผลของโครงสร้างฉนวน

ฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำ เกิดจากเพรสบอร์ดและน้ำมัน เพรสบอร์ดใช้เป็นตัวกั้นและสเปเซอร์ (Spacer) ในขณะที่ช่องน้ำมันในท่อถูกใช้ทางผ่านของน้ำมันเพื่อเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน จำนวนของเพรสบอร์ดและจำนวนช่องน้ำมันที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ระดับพลังงาน (VA) ประเภทการระบายความร้อน ตัวเลือกการออกแบบของผู้ผลิต เป็นต้น สัดส่วนของน้ำมัน กระดาษ และเพรสบอร์ดในการประกอบฉนวนจึงมักมีความแตกต่างกันในหม้อแปลงไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนั้นการศึกษาอย่างรอบคอบจึงจำเป็นเพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของโครงสร้างของฉนวนที่มีต่อการวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่



รูปที่ 2.10  $\tan \delta$  ของโครงสร้างของฉนวนที่แตกต่างกันสำหรับอัตราส่วนน้ำมันและเพรสบอร์ด

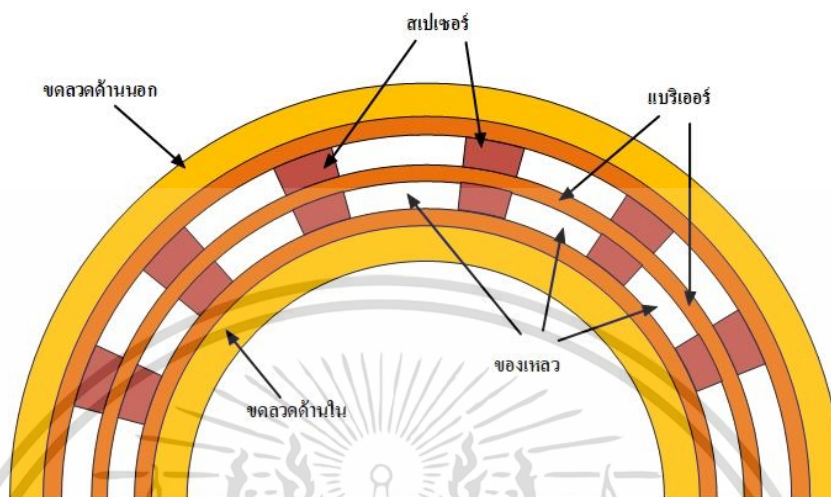
เพื่อตรวจสอบเพิ่มเติมถึงผลกระทบของโครงสร้างของฉนวนต่อการตอบสนองไดอิเล็กทริกของฉนวน การตั้งค่าการทดลองได้รับการพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย โดยจำลองโครงสร้างขดลวดและฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าจริงตามรูปที่ 2.10 [7]

2.3 แบบจำลอง X-Y [11]

ความชื้น ความเป็นกรด อุณหภูมิขณะทำงานในสภาวะปกติ ปฏิกริยาดีพอลิเมอร์เซชันและสาเหตุอื่น ๆ มีผลกับค่าการนำไฟฟ้าและอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า การวัดความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นจะช่วยบ่งบอกถึงอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าและสถานะของฉนวนได้ โดยค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกจะแปรผันตรงกับอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่จะแปรผกผันกับย่านความถี่ คือ ย่านความถี่สูงจะมีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าย่านความถี่ต่ำ ซึ่งความแม่นยำของอุปกรณ์มีผลต่อ

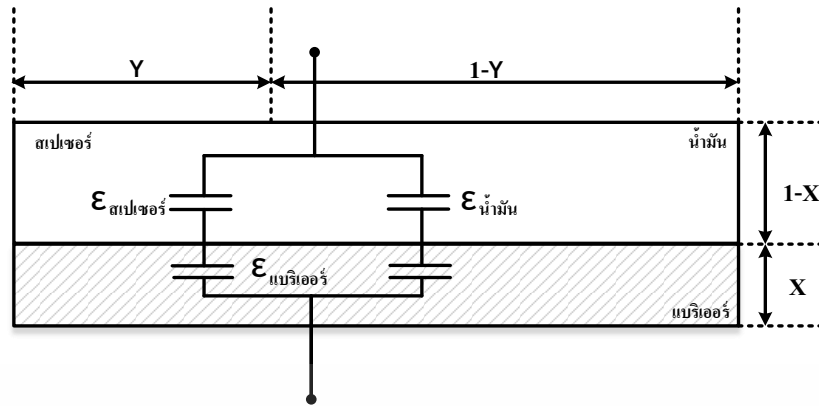
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่ามากโดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำ การทดสอบอาจจะไม่รับประกันความถูกต้องของผลลัพธ์ที่วัดได้ หากไม่มีการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสม



รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางของโครงสร้างฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้า

การตีความผลลัพธ์ของการวัดการตอบสนองของไดอิเล็กทริก มีจุดประสงค์เพื่อประเมินปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในส่วนที่เป็นของแข็งของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลอง X-Y โครงสร้างที่แสดงในรูปนี้เป็นแบบจำลองที่เรียบง่ายของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าจริง เราคาดฉนวนทรงกระบอกนี้สามารถแสดงด้วยแบบจำลองตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานแบบก้อน ในแบบจำลอง X-Y แบรีเออร์ สเปเซอร์ และช่องน้ำมันทั้งหมด จะรวมกันตามจำนวนสัมพัทธ์ของสเปเซอร์และแบรีเออร์ ในช่องน้ำมัน ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนปริมาตรของส่วนประกอบระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.11 อัตราส่วนของผลรวมของความหนาทั้งหมดของสิ่งกีดขวางทั้งหมดในท่อรวมกันและหารด้วยความกว้างของท่อ (X) ความครอบคลุมของสเปเซอร์ (Y) ถูกกำหนดให้เป็นความกว้างรวมของสเปเซอร์ทั้งหมดหารด้วยความยาวทั้งหมดของขอบของท่อ ค่าทั่วไปของ X ในหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.2–0.5 ผลของโครงสร้างที่มีต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในโดเมนความถี่ซึ่งวัดการตอบสนองไดอิเล็กทริกของแบบจำลองฉนวนที่แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลอง X-Y ของโครงสร้างฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์หาได้จาก

$$\varepsilon(\omega, T) = \left[ \frac{Y}{\left(\frac{1-x}{\varepsilon_{Spacer}}\right) + \left(\frac{X}{\varepsilon_{Barrier}}\right)} \right] + \left[ \frac{1-Y}{\left(\frac{1-X}{\varepsilon_{Oil}}\right) + \left(\frac{X}{\varepsilon_{Barrier}}\right)} \right] \tag{2-5}$$

เมื่อ

$X = (\text{ความหนาแน่นของสิ่งกีดขวาง/ความกว้างของทรงกลม}) \times 100\%$

$Y = (\text{ความกว้างรวมของสเปเซอร์} / 2 \pi r) \times 100\%$ , หรือความกว้างบล็อคสเปเซอร์รวมใน

แหวนทั้งหมด

### 2.4 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (Health Indexing, HI) [12]

HI เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ผู้ดูแลสามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วและมีข้อมูลครบถ้วนโดยการรวบรวมและประมวลผลข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อประโยชน์ในการประเมินสภาพโดยรวมด้วยวิธีนี้จะสามารถตรวจสอบความต้องการของการบำรุงรักษาของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละรายการ

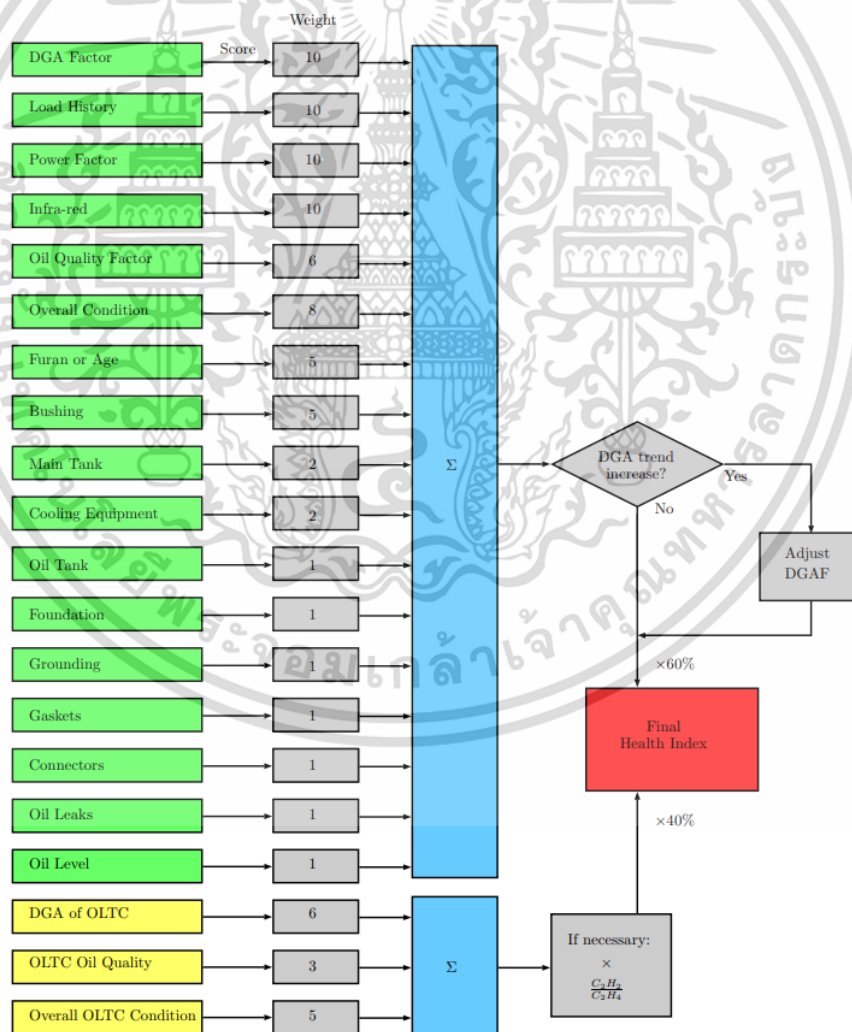
การจัดอันดับ ดังกล่าวมักจะยึดตามคะแนนใดคะแนนหนึ่งหรือหลายคะแนน ซึ่งจะพบจากชุดของอัลกอริทึมที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อประเมินทั้งข้อมูลการทำงานและสภาพของอุปกรณ์ อัลกอริทึมเหล่านี้มักจะประเมินระบบย่อยที่แยกจากกันของหม้อแปลงไฟฟ้า และสุดท้ายจะถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างคะแนนสุดท้าย ซึ่งแสดงถึงสภาพโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า

แรงจูงใจที่สำคัญสำหรับการสร้างดัชนีสุขภาพคือความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับการกระจายทรัพยากรที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งผู้จัดการสินทรัพย์หลายคนต้องเผชิญ ซึ่งรวมถึงความสามารถในการกำหนดเวลาการบำรุงรักษาและการลงทุนด้วยวิธีที่เหมาะสมทางเศรษฐกิจ

### ดัชนีสุขภาพโดย Kinetrics

วิธีการนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Kinetrics Inc. ในประเทศแคนาดา ซึ่งถูกนำเสนอโครงสร้างสำหรับการประเมินสภาพโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า วิธีการนี้ใช้ข้อมูลจากการบำรุงรักษาและข้อมูลการวินิจฉัยเป็นอินพุต และกำหนดคะแนนให้กับระบบย่อยต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านอัลกอริทึมการประเมินแบบกำหนดเอง เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบทางสถิติแต่เน้นที่ข้อมูลเงื่อนไขเท่านั้น นอกจากนี้ยังให้คำอธิบายโดยละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการของการประเมิน ซึ่งข้อมูลสภาพการณ์หลายอย่าง (Several of the condition data) เป็นข้อมูลที่ถูกใช้โดยปกติของผู้ใช้งาน

อินพุตของโมเดลนี้ใช้เฉพาะข้อมูลจากการบำรุงรักษาตามปกติและข้อมูลสภาพของหม้อแปลงเป็นอินพุตในการประเมินหม้อแปลงไฟฟ้า ข้อมูลที่จำเป็นถูกแสดงในแผนผังของการประมวลผลซึ่งสามารถแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนผังแสดงการคำนวณดัชนีสุขภาพ ข้อมูลอินพุตที่ต้องการ และขั้นตอนการคำนวณ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คะแนนดัชนีสุขภาพคำนวณโดยการให้น้ำหนักการให้คะแนนเงื่อนไขต่างๆ ที่สัมพันธ์กับความสำคัญสำหรับเงื่อนไขทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับแต่ละองค์ประกอบของคะแนนจริงจะถูกหารด้วยคะแนนสูงสุดที่เป็นไปได้ แล้วคูณด้วย 100 ด้วยวิธีนี้ผลรวมของคะแนนจะถูกทำให้เป็นมาตรฐานเป็นคะแนนสูงสุด 100 คะแนน ซึ่งบ่งบอกถึงสภาพที่สมบูรณ์ ขั้นตอนการหาผลลัพธ์สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2-6 และน้ำหนักของการให้คะแนนเงื่อนไขต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.5 การให้คะแนนเงื่อนไขแต่ละรายการ (A,B,C,D,E) จะถูกแปลงเป็นปัจจัยดัชนีสุขภาพระหว่าง 4 ถึง 0 ตามลำดับ ในสมการที่ 2-6 ส่วนแบ่งที่แตกต่างกันสองส่วนแสดงถึงการคำนวณในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าและส่วนของอุปกรณ์เปลี่ยนแทปตามลำดับ อัตราส่วนที่ 60% และ 40% ใช้เพื่อสะท้อนถึงสัดส่วนของความผิดปกติของอุปกรณ์เปลี่ยนแทปที่สัมพันธ์กับความผิดปกติประเภทอื่นๆ ซึ่งถูกระบุจากการสำรวจที่เกี่ยวกับความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าโดย [13] แต่ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างง่ายดาย ซึ่งเปลี่ยนไปตามความแตกต่างของการกระจายของความล้มเหลว (failure) ที่เกิดขึ้นกับกลุ่มของหม้อแปลงที่ถูกพิจารณา

$$\left( \frac{\sum_{j=1}^{j=17} K_j HIF_j}{\sum_{j=1}^{j=17} 4K_j} \times 60\% \right) + \left( \frac{\sum_{j=18}^{j=20} K_j HIF_j}{\sum_{j=18}^{j=20} 4K_j} \times 40\% \right) = \text{Health Index} \quad (2-6)$$

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของคะแนนดัชนีสุขภาพและสภาวะของหม้อแปลงสำหรับโมเดล Kinectrics

Health Index	Condition	Description	Approximate Expected Lifetime
85-100	Very Good	Some aging or minor deterioration of a limited number of components	More than 15 years
70-85	Good	Significant deterioration of some components	More than 10 years
50-70	Fair	Widespread significant deterioration or serious deterioration of specific components	Up to 10 years
30-50	Poor	Widespread serious deterioration	Less than 3 years
0-30	Very poor	Extensive serious deterioration	At End-of-Life

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การประเมินอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

กระดาษไม่เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นฉนวนแต่ยังทำหน้าที่รับแรงทางกลที่เกิดจาก เนื่องกระดาษมีการพันรอบตัวนำอย่างแน่นหนาซึ่งทำให้ขดลวดคงอยู่กับที่ในระหว่างที่เกิดความเครียดทางกล เมื่อฉนวนเซลลูโลสมีอายุมากขึ้น สิ่งนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นฉนวน แต่จะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงเชิงกล [14] ถ้าขดลวดถูกกระทำด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าสูง ฉนวนกระดาษอาจอ่อนตัวและตัวนำอาจทำให้เกิดการลัดวงจรของขดลวด ความแข็งแรงเชิงกลของกระดาษจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการแตกตัวของโมเลกุลเซลลูโลส เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งเขียนสูตรโมเลกุลทางเคมีได้ว่า  $C_6H_{10}O_5)_n$  โดยที่  $C_6H_{10}O_5$  เรียกว่าหน่วยโมโนเมอร์ [15] ปัจจัย  $n$  คือจำนวนของโมโนเมอร์ที่ถูกตรึงไว้เข้าด้วยกันเพื่อสร้างโพลิเมอร์ และมักเรียกว่าระดับของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (DP) จากการทดลองที่ดำเนินการที่ SINTEF Energy Research พบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีแรงดึงและระดับ DP สามารถใช้เพื่อกำหนดความสามารถของขดลวดในการทนต่อความเค้นเชิงกล [16] การย่อยสลายของกระดาษในรูปของระดับ DP สามารถอธิบายได้ในทางคณิตศาสตร์ เป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง โดยใช้สมการอาร์เรเนียสซึ่งแบบจำลองที่อธิบายโดย Lundgaard และคณะ โดยที่อุณหภูมิเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของกระดาษ ซึ่งแสดงในสมการ (2-7)

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = A \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \cdot t \quad (2-7)$$

ในสมการนี้  $A$  เป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมทางเคมีในหน่วย  $[เวลา^{-1}]$   $E$  คือพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาในหน่วย  $[kJ/mol]$   $R$  คือค่าคงที่ของแก๊สในหน่วย  $[J/mol/K]$   $T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วย  $[K]$  และ  $t$  คือเวลาในหน่วย  $[h]$  ค่าสัมประสิทธิ์  $A$  และ  $E$  จะให้ค่าที่แตกต่างกันสำหรับกระดาษประเภทต่างๆ รวมถึงสภาพแวดล้อมทางเคมีที่แตกต่างกัน ระดับความชื้นและออกซิเจนที่แตกต่างกันสำหรับกระดาษคราฟท์และกระดาษที่อัดเกรดทางความร้อนแสดงไว้ในตารางที่ 2.6 และ ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ค่า  $A$  และ  $E$  สำหรับกระดาษคราฟท์ภายใต้สภาพแวดล้อมทางเคมีที่แตกต่างกัน

Parameter	Dry, no oxygen	1.5% moisture	3.5% moisture	Dry with oxygen
$E_A$	128	128	128	89
$A$	$4 \times 10^{10}$	$1.5 \times 10^{11}$	$4.5 \times 10^{11}$	$4.6 \times 10^{11}$

ตารางที่ 2.7 ค่า A และ E สำหรับกระดาษฉนวนทางความร้อนภายใต้สภาพแวดล้อมทางเคมีที่แตกต่างกัน

Parameter	Dry, no oxygen	1.5% moisture	3.5% moisture	Dry with oxygen
$E_A$	128	128	128	89
A	$4 \times 10^{10}$	$1.5 \times 10^{11}$	$4.5 \times 10^{11}$	$4.6 \times 10^{11}$

การย่อยสลายของกระดาษฉนวนเป็น การรวมกันของกระบวนการย่อยสลาย ไฮโดรไลซิส ออกซิเดชัน และไพโรไลซิส ในจำนวนนี้ไฮโดรไลซิสและออกซิเดชันเป็นสาเหตุหลักของการย่อยสลาย ภายใต้การทำงานปกติ ไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยความเป็นกรดและความชื้นของฉนวน กระดาษอย่างมาก กระดาษที่อับเกรดดูจะมีทนทานต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ดีกว่ากระดาษกราฟ ในอัตราที่ต่ำกว่าภายใต้สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิเดียวกัน เพื่อให้เกิดออกซิเดชันในอัตราที่มีนัยสำคัญ ปริมาณออกซิเจนจะต้องเกินเกณฑ์ หากปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าค่าเกณฑ์ การมีส่วนร่วมของปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อการเสื่อมสภาพของกระดาษจะต่ำเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เกณฑ์นี้ กำหนดไว้ที่ประมาณ 5,000 ppm ดังนั้นการออกซิเดชันจะมีอิทธิพลมากกว่าในหม้อแปลงชนิดหายใจ อีสาระมากกว่าแบบปิดผนึก (Seal Type) และอัตราการเสื่อมสภาพของกระดาษกราฟและกระดาษ อับเกรดเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันดูเหมือนจะเกิดขึ้นในอัตราที่ใกล้เคียงกัน [16] ในทางกลับกัน ไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นโดยไม่คำนึงถึงออกซิเจนและความชื้น แต่เกิดในกรณีที่อุณหภูมิของกระดาษสูงกว่า อุณหภูมิการทำงานปกติอย่างมากเท่านั้น สำหรับอุณหภูมิที่สูงมาก อัตราการเสื่อมสภาพเนื่องจากไพโรไลซิสจะมีความโดดเด่นเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไลซิสและออกซิเดชัน อุณหภูมิที่สูงอาจเกิดจากข้อต่อและจุดเชื่อมต่อในตัวนำที่เชื่อมต่อกันไม่ดี และอาจทำให้กระดาษกลายเป็นคาร์บอนจนหมดเมื่อเวลาผ่านไป ปัญหาในการประมาณอัตราการเสื่อมสภาพของกระดาษคือความจริงที่ว่ากระบวนการไฮโดรไลซิสและออกซิเดชันทำงานร่วมกัน ออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่สร้างคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งจะเพิ่มความชื้นของขดลวดและเร่งกระบวนการไฮโดรไลซิส [17] เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างถ่องแท้ จึงต้องมีความระมัดระวังเมื่อคำนวณอัตราการเสื่อมสภาพของสภาพแวดล้อมที่กำหนด และสำหรับการประมาณค่าคร่าวๆ เกี่ยวกับสถานะของฉนวน อย่างไรก็ตาม การประมาณว่ากระบวนการทั้งสองทำงานเป็นอิสระจากกันอาจเพียงพอแล้ว [17] เพื่อประเมินสภาพของฉนวนแข็งของหม้อแปลง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบว่าอัตราการย่อยสลายได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมอย่างไร อย่างไรก็ตาม ปัจจัยเดียวที่มีอิทธิพลมากที่สุดคืออุณหภูมิที่เกิดการย่อยสลาย ในการวัดหรืออย่างน้อยก็ประมาณอุณหภูมินี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งเมื่อต้องประเมินสถานะของฉนวนแข็ง อาจวัดอุณหภูมิได้โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบไฟเบอร์ออปติกที่ติดตั้งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ดังกล่าวถูกใช้งานเฉพาะกับหม้อแปลงสมัยใหม่เท่านั้น สำหรับหม้อแปลงที่ไม่มีการใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานอุปกรณ์ดังกล่าว อุณหภูมิของขดลวดจึงต้องวัดจากน้ำมันด้านบนหรือประมาณจากโหนดที่มีการใช้งาน เนื่องจากการกระจายอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไม่สม่ำเสมอ บางพื้นที่ของฉนวนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น พื้นที่เหล่านี้ซึ่งมักเรียกว่าจุดฮอตสปอต (Hot-spot) คือบริเวณที่ฉนวนคาดว่าจะเสื่อมสภาพไปไกลที่สุดซึ่งจะแสดงถึง "จุดอ่อนที่สุด" ของฉนวนแข็ง และการประมาณสภาพของฉนวนผ่านสมการที่ 2-7 จึงควรมุ่งเป้าไปที่การประเมินฉนวนที่เกิดขึ้นบริเวณจุดฮอตสปอต

มาตรฐาน IEC 60076-7 นำเสนอวิธีการคำนวณอุณหภูมิฮอตสปอตผ่านสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งช่วยให้สามารถอธิบายอุณหภูมิฮอตสปอตเป็นฟังก์ชันของเวลา โหลด และอุณหภูมิโดยรอบได้ สมการนี้ยังคำนึงถึงการออกแบบและวิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงตามสมการที่ 2-8

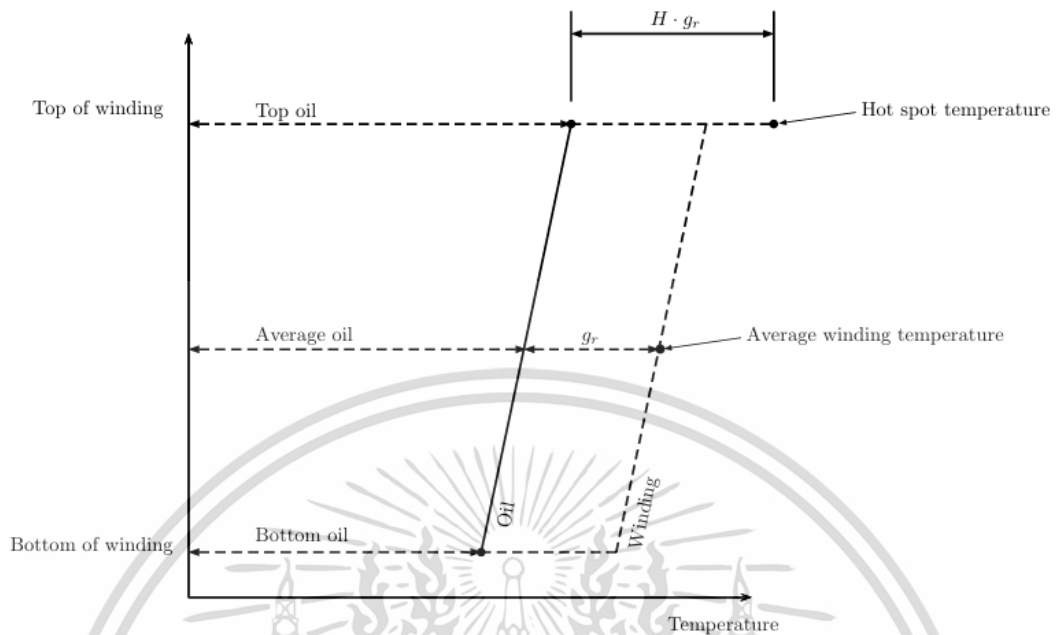
$$\theta_h(t) = \theta_a + \Delta\theta_{or} \cdot \left[ \frac{1 + R \cdot K^2}{1 + R} \right]^x + H g_r K^y \quad (2-8)$$

ในสมการนี้  $\theta_h(t)$  คืออุณหภูมิฮอตสปอต,  $\theta_a$  คืออุณหภูมิโดยรอบ,  $\Delta\theta_{or}$  หรือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำมันสูงสุดและสภาพแวดล้อมสำหรับโหนดที่ระบุ,  $R$  คืออัตราส่วนระหว่างค่าความสูญเสียที่พิกัดและค่าความสูญเสียที่ไม่มีโหลดโหนด,  $K$  โหลดต่อหน่วย (Per-unit),  $x$  เลขชี้กำลังน้ำมัน,  $H$  แฟกเตอร์ฮอตสปอต,  $g_r$  อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากน้ำมันถึงขดลวด และ  $y$  ค่าคงที่เลขชี้กำลัง ค่าคงที่  $R$ ,  $x$ ,  $H$ ,  $g_r$  และ  $y$  เป็นค่าเฉพาะของหม้อแปลง และขึ้นอยู่กับ การออกแบบและวิธีการระบายความร้อน ซึ่งค่าที่แนะนำถูกกำหนดโดย IEC 60076-7 [18] และถูกแสดงในตารางที่ 2.8 เพื่อแสดงให้เห็นหลักการเบื้องหลังการคำนวณนี้ จึงมีการพิจารณารูปที่ 2.14

ตารางที่ 2.8 พารามิเตอร์การคำนวณที่ใช้ในการคำนวณฮอตสปอตของหม้อแปลงไฟฟ้าตามที่ยอธิบายไว้ใน IEC 60076-7

Cooling mode	$x$	$y$	$R$	$H$	$g_r$	$\Delta\theta_{or}$
ONAN	0.8	1.3	6	1.3	20	52
ONAF	0.8	1.3	6	1.3	20	52
OF...	1	1.3	6	1.3	17	56
OD...	1	2	6	1.3	22.3	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แผนภาพความร้อนแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิแนวตั้งสำหรับน้ำมันและขดลวดตามที่อธิบายไว้ใน IEC 60076-7 แกนนอนแสดงถึงอุณหภูมิในขณะที่แกนแนวตั้งแสดงถึงตำแหน่งแนวตั้งภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ การจัดทำดัชนีสุขภาพและการ ประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทนี้อธิบายถึงการออกแบบการทดลอง รายละเอียดของการทดลอง ชุดทดสอบ และ  
วงจรการทดสอบของการทดสอบผลตอบสนองไดอิเล็กทริกเพื่อการศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกใน  
การประเมินปริมาณความชื้นในเพอร์สโอร์ตที่อิมเพกเนตจากฉนวนเหลว 2 ชนิด รวมไปถึงการจัดทำ  
ดัชนีสุขภาพ และการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 122/175 MVA 115 KV – 15.75 KV  
โดยการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน 1.การทดสอบผลตอบสนองไดอิเล็กท  
ริกในการประเมินปริมาณความชื้นภายในเพอร์สโอร์ตภายในห้องปฏิบัติการ และ 2.การจัดทำดัชนี  
สุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 3.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในการประเมินปริมาณ ความชื้นในเพอร์สโอร์ตที่อิมเพกเนตจากฉนวนเหลว 2 ชนิด

การทดลองนี้ศึกษาวิธีการประเมินความชื้นจากเพอร์สโอร์ตที่ถูกทำให้เสื่อมสภาพภายใต้ความ  
ร้อนในระยะเวลาที่แตกต่างกัน มีการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบได้ถูกจัดเตรียมดังนี้

1. เอสเทอร์ธรรมชาติ (Natural Ester, NE) และน้ำมันแร่ (Mineral Oil, MO) ที่ไม่ผ่านการ  
ใช้งานถูกนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 200 มิลลิบาร์ เป็น  
ระยะเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้นส่วนเกินออกไป ดังรูปที่ 3.1
2. เพอร์สโอร์ตที่ไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งมีขนาด 120x120x1.6 มิลลิเมตร ถูกนำไปอบในตู้อบ  
สุญญากาศที่ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 200 มิลลิบาร์ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง  
สำหรับการจำลองตัวอย่างทดสอบ โดยเพอร์สโอร์ตจะถูกจัดลงในภาชนะที่มีระยะห่างให้  
ความชื้นสามารถถูกขับออกมาได้ ดังรูปที่ 3.2
3. หลังจาก NE, MO และเพอร์สโอร์ตเย็นตัวลงตามธรรมชาติ เพอร์สโอร์ตจะถูกอิมเพกเนต  
ด้วยน้ำมัน NE และ MO โดยเพอร์สโอร์ตจะถูกจัดลงในภาชนะที่มีระยะห่างพอที่จะทำให้  
น้ำมันแทรกตัวเข้าไปในเพอร์สโอร์ตทั้งหมดดังรูปที่ 3.3 จากนั้นเติม NE ลงไปในภาชนะที่ 1  
และเติม MO ลงไปในภาชนะที่ 2 และเข้าไปอบในเตาอบสุญญากาศที่ 60 องศาเซลเซียส  
ความดัน 200 มิลลิบาร์ เป็นระยะเวลา 0, 8, 16 และ 24 ชั่วโมงสำหรับการจำลอง  
ตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบสรุปได้ดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เอสเตอร์ธรรมชาติที่ถูกนำไปอบเพื่อกำจัดความชื้นส่วนเกินออก



รูปที่ 3.2 เพรสบอร์ดที่ถูกจัดเรียงและนำไปอบ



รูปที่ 3.3 เพรสบอร์ดที่ถูกจัดเรียงและนำไปอิมเพรกเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 รายการตัวอย่างที่ถูกเตรียมสำหรับการทดลอง

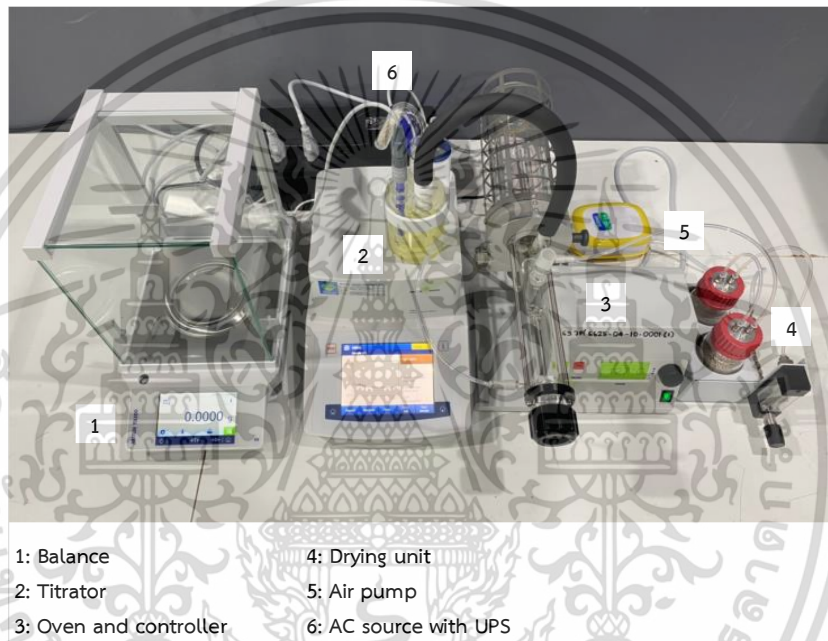
ตัวอย่างทดสอบ	การอบเพรสบอร์ดด้วยความร้อน 150 องศาเซลเซียส	เวลาอิมเพรกเนต
1 (MO)	0 วัน	0 ชั่วโมง
2 (MO)		8 ชั่วโมง
3 (MO)		16 ชั่วโมง
4 (MO)		24 ชั่วโมง
5 (MO)	30 วัน	0 ชั่วโมง
6 (MO)		8 ชั่วโมง
7 (MO)		16 ชั่วโมง
8 (MO)		24 ชั่วโมง
9 (MO)	90 วัน	0 ชั่วโมง
10 (MO)		8 ชั่วโมง
11 (MO)		16 ชั่วโมง
12 (MO)		24 ชั่วโมง
13 (NE)	0 วัน	0 ชั่วโมง
14 (NE)		8 ชั่วโมง
15 (NE)		16 ชั่วโมง
16 (NE)		24 ชั่วโมง
17 (NE)	30 วัน	0 ชั่วโมง
18 (NE)		8 ชั่วโมง
19 (NE)		16 ชั่วโมง
20 (NE)		24 ชั่วโมง
21 (NE)	90 วัน	0 ชั่วโมง
22 (NE)		8 ชั่วโมง
23 (NE)		16 ชั่วโมง
24 (NE)		24 ชั่วโมง

หลักจากเสร็จสิ้นกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานที่ถูกอิมเพรกเนตและถูกทำให้เสื่อมสภาพด้วยความร้อนด้วย MO จะถูกนำไปทดสอบหาค่าประกอบความชื้นในชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค Coulometric Karl Fisher และการทดสอบสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, FDS) เพื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่วัดได้จากสองเทคนิคนี้ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

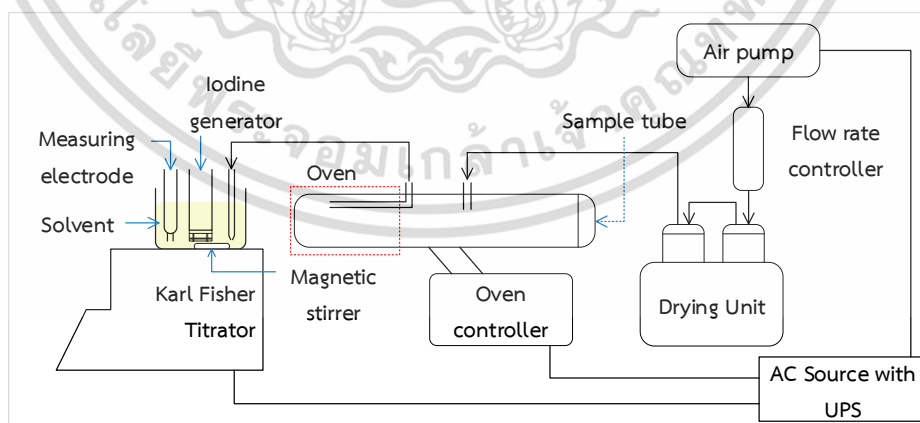
ตัวอย่างของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตและถูกทำให้เสื่อมสภาพด้วย NE จะทดสอบสเปกโตรสโคปีในโดเมนความถี่ (Frequency Domain Spectroscopy, FDS) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนที่ระยะเวลาการอิมเพรกเนตและเวลาในการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกัน

### 3.1.2 การทดสอบองค์ประกอบความชื้น

การทดสอบหาความชื้นในเพรสบอร์ดนี้เป็นการทดสอบทางเคมีเพื่อบ่งบอกปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในเพรสบอร์ด ทดสอบด้วยวิธีการไทเทรตผ่านเทคนิค Coulometric Karl Fisher ชุดทดสอบองค์ประกอบความชื้นแสดงดังรูปที่ 3.4



(ก) อุปกรณ์การทดสอบองค์ประกอบความชื้นเทคนิค Coulometric Karl Fisher



(ข) ไตอะแกรมของอุปกรณ์ทดสอบองค์ประกอบความชื้น

### รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบองค์ประกอบความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบองค์ประกอบความชื้นมีดังนี้

- จัดอุปกรณ์ทดสอบองค์ประกอบความชื้นตามรูปที่ 3.4
- เตรียมความพร้อมของเครื่องทดสอบ
- ตัดชิ้นงานทดสอบให้เป็นชิ้นเล็ก รวมกันให้มีน้ำหนัก 1-2 กรัม ดังรูปที่ 3.5
- ใส่ชิ้นงานทดสอบเข้าไปในเครื่องทดสอบเพื่อหาองค์ประกอบความชื้น
- ทดสอบองค์ประกอบความชื้น 3 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง และคำนวณหาค่าเฉลี่ย



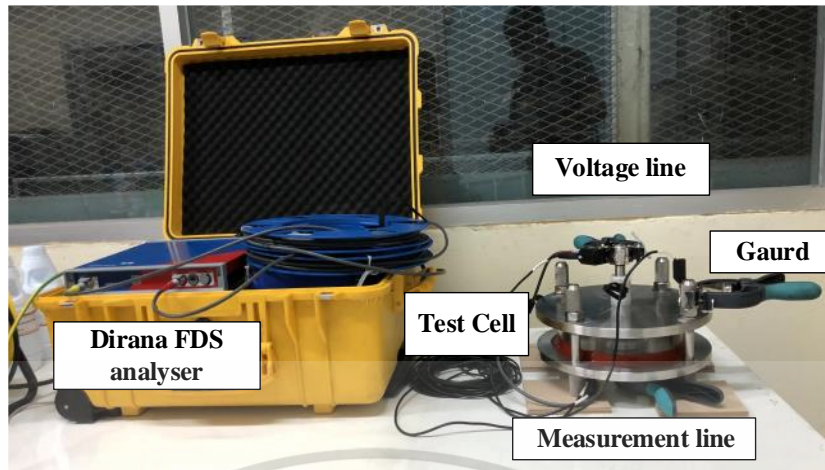
รูปที่ 3.5 เพอร์สบอร์ดที่ใช้ในการทดสอบและเพอร์สบอร์ดซึ่งถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก

### 3.1.3 การทดสอบองค์ประกอบความชื้นด้วยสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่

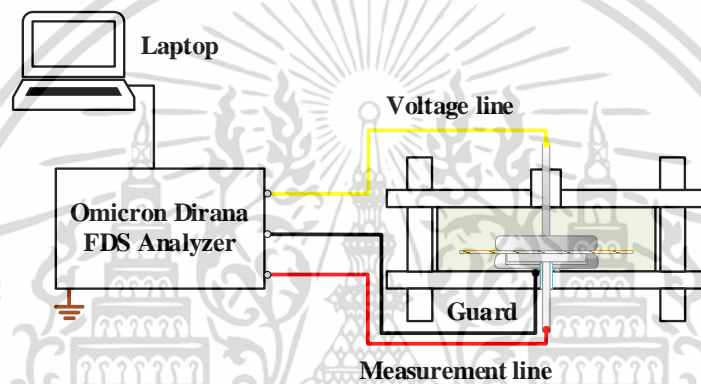
สเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่จะถูกจัดตั้งตามรูปที่ 3.6 ส่วนประกอบหลักประกอบด้วย เซลล์ทดสอบ (Test Cell), เครื่องวิเคราะห์ Omicron Dirana FDS และแล็บที่อ็อป เซลล์ทดสอบถูกทำความสะอาดก่อนนำมาใช้งาน เซลล์ทดสอบจะประกอบด้วย อิเล็กโทรดแบบจานระนาบซึ่งทำมาจากสแตนเลสที่มี 3 ขั้ว โดยอิเล็กโทรดด้านล่างมีการเชื่อมต่อวงแหวนป้องกัน (Guard) และอิเล็กโทรดการวัด (Measurement) เข้าด้วยกัน และสายแรงดันไฟฟ้าถูกจ่ายไปที่อิเล็กโทรดด้านบน NE และ MO ที่ผ่านการกำจัดความชื้นออกและใส่แก๊สออกถูกเติมเข้าไปจนกระทั่งท่วมอิเล็กโทรดด้าน เครื่องวิเคราะห์ Omicron Dirana FDS ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า AC ที่มีแอมพลิจูด 200 V และดำเนินการวิเคราะห์ FDS ในช่วงความถี่ 1 mHz ถึง 5 kHz การทดสอบถูกทำในอุณหภูมิห้อง

หลังจากการทดสอบเส้นโค้ง FDS ที่ได้จากแต่ละกรณีจะถูกนำไปหาเส้นโค้งที่เหมาะสมเพื่อหาค่าความชื้นที่ใกล้เคียงผ่านโปรแกรม OMICRON Primary Test Manager (PTM) โดยตัวอย่างการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมจากโปรแกรมแสดง

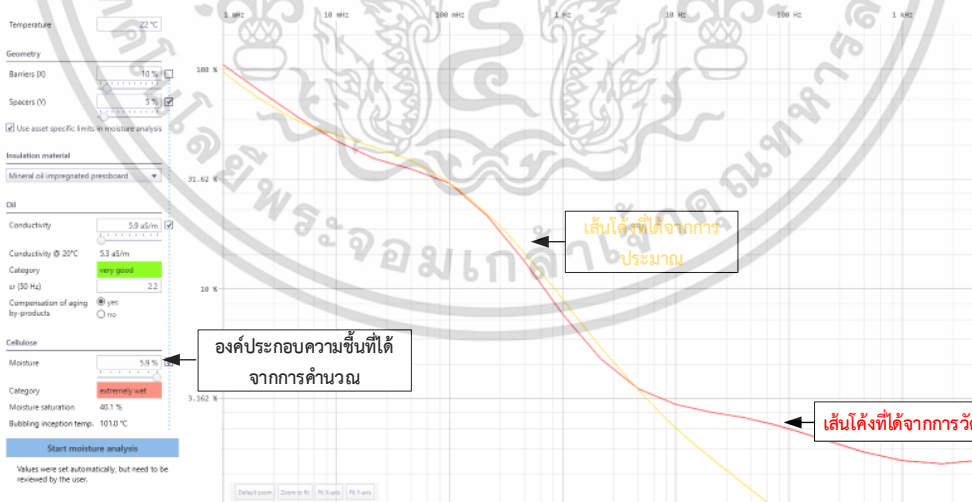
รูปที่ 3.7 ซึ่งหลังจากโปรแกรมทำการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมแล้วจะสามารถให้ค่าการประมาณองค์ประกอบความชื้นของเพอร์สบอร์ดได้



(ก) อุปกรณ์การทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่



(ข) ไดอะแกรมของอุปกรณ์ทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่  
รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมจากโปรแกรม OMICRON Primary Test Manager

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การจัดทำดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 3.2.1 การจัดทำดัชนีสุขภาพ

ในส่วนของกรจัดทำดัชนีสุขภาพ วิธีที่ใช้ในการประเมินดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงซึ่งเดิมพัฒนาโดย Kinectrics Inc. (2009) ในแคนาดา วิธีนี้จะใช้ข้อมูลการซ่อมบำรุงและข้อมูลการวินิจฉัยเป็นอินพุต และใช้อัลกอริทึมการประเมินแบบกำหนดเองเพื่อกำหนดคะแนนให้กับระบบย่อยต่างๆของหม้อแปลง สำหรับการประเมินนี้ แบบจำลอง Kinectrics ได้รับการแก้ไขเนื่องจากคะแนนอินพุตบางส่วนของ Kinectrics มอบให้จะขึ้นอยู่กับภูมิหลังและระดับความเชี่ยวชาญของวิศวกรที่ดำเนินการตรวจสอบซึ่งทำให้การประเมินเหล่านี้ให้ข้อบ่งชี้เบื้องต้นเกี่ยวกับสภาพของอุปกรณ์และอาจไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน โดยในงานวิจัยนี้โมเดลได้รับการดัดแปลงดังนี้:

- การประเมินนี้ได้รับการพัฒนาโดยการปรับเปลี่ยนวิธีการรับคะแนนอินพุตตามเกณฑ์จากมาตรฐานที่เกี่ยวข้องหรือข้อเสนอแนะจาก CIGRE และงานวิจัยอื่น ๆ โดยเกี่ยวข้องกับกำหนดคะแนน (0, 1, 2, 3, 4) สำหรับผลการทดสอบต่างๆ
- การประเมินนี้ใช้การวัดพิเศษหรือขั้นสูง เช่น FDS สำหรับการประเมินฉนวนภายในหม้อแปลง เพื่อให้การประเมินเชิงลึกและตรวจสอบความสอดคล้องของผลการประเมิน
- นอกจากนี้จะมีการวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊สซึ่งจะทำหน้าที่เป็นปัจจัยในการลดคะแนน HI ในกรณีที่บ่งชี้ถึงความผิดปกติเกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

คาดว่าวิธีการที่เสนอจะส่งผลให้ได้คะแนน HI ที่สะท้อนสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แม่นยำยิ่งขึ้น เนื่องจากเกณฑ์การให้คะแนนทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สิ่งนี้จะส่งผลให้มีการประเมินที่มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกว่าการประเมินปกติที่ได้รับจาก Kinectrics

แผนผังวิธีการในการจัดทำดัชนีสุขภาพแสดงตามรูปที่ 3.8 ในการจัดทำดัชนีสุขภาพของหม้อแปลง การประเมินฉนวนภายในหม้อแปลงจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

- ฉนวนหลักภายในหม้อแปลงด้วยการทดสอบทางไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย การทดสอบทางไฟฟ้าทั่วไป, การทดสอบ FDS, และการประเมินจำนวนมอโนเมอร์เฉลี่ยต่อหนึ่งสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) ภาพรวมของการคำนวณแสดงในรูปที่ 3.9
- การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA)
- การประเมินคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงจากหัวข้อการทดสอบทางเคมีและทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

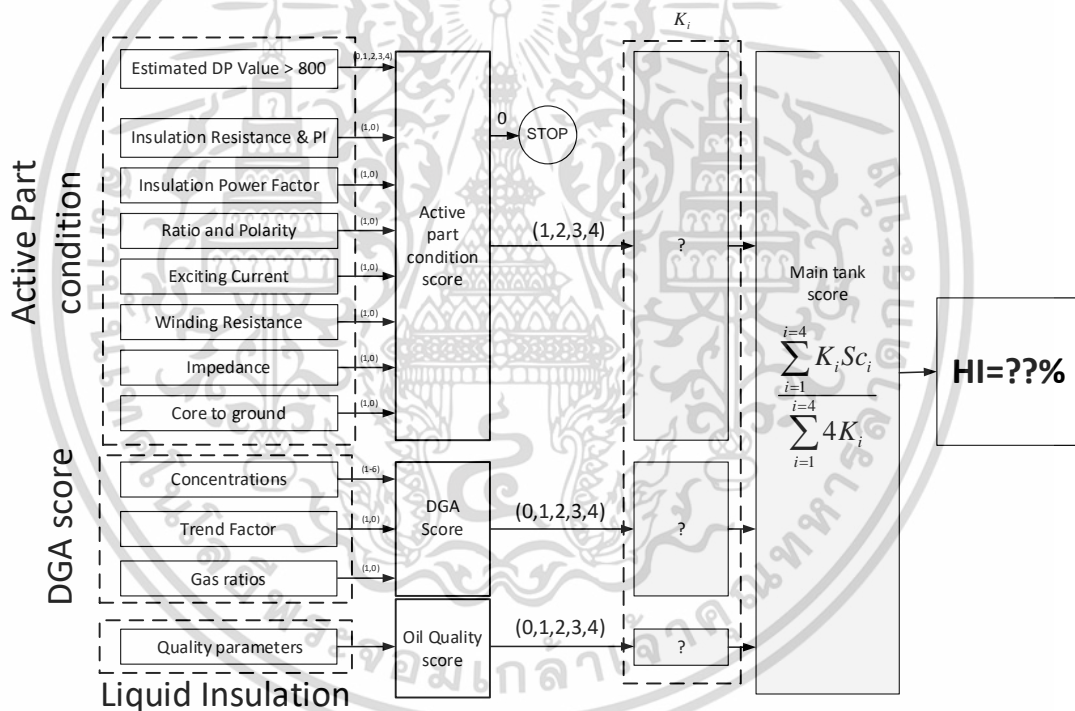
ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากแต่ละส่วนจะถูกเรียกว่าคะแนนสถานะ ( $Sc_i$ ) จะถูกนำมาให้น้ำหนัก ( $K_i$ ) คะแนนแต่ละพาทที่ถูกคูณด้วยน้ำหนักแล้วจะถูกนำไปคำนวณตามสมการที่ 3-1 เพื่อได้ออกมาเป็นคะแนนดัชนีสุขภาพของฉนวนภายในหม้อแปลง

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=3} K_i Sc_i}{\sum_{i=1}^{i=3} 4K_i} \times 100 = \text{Health Index} \tag{3-1}$$

เมื่อ

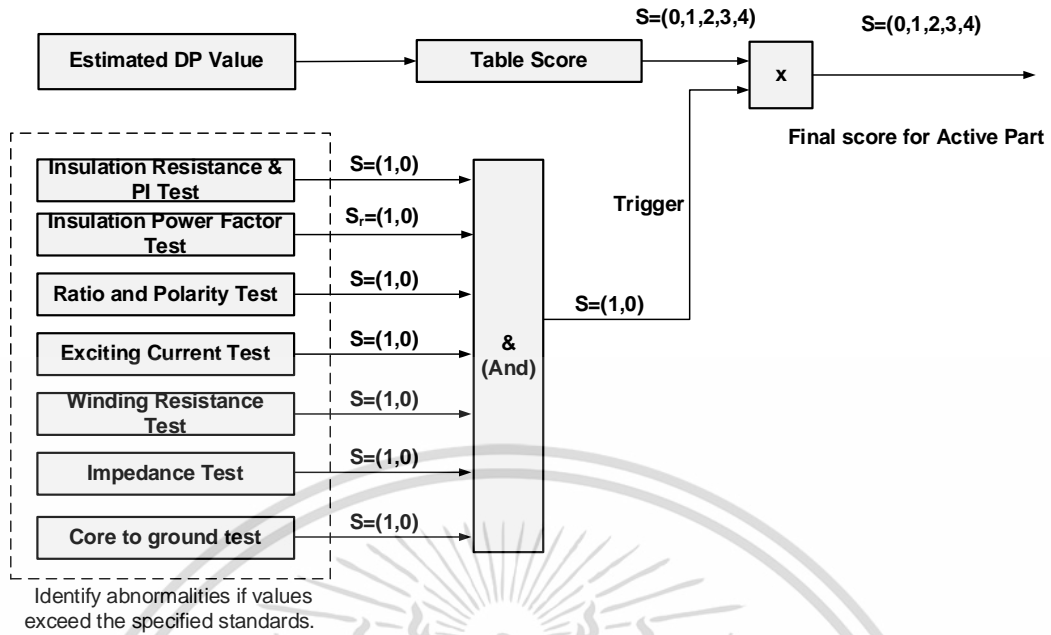
$K_i$  น้ำหนักการให้คะแนนของส่วนประกอบนั้น

$Sc_i$  คะแนนที่ส่วนประกอบนั้นได้รับมาจากการประเมิน



รูปที่ 3.8 แผนผังวิธีคำนวณคะแนนดัชนีสุขภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แผนผังวิธีคำนวณคะแนนสถานะของฉนวนภายในหม้อแปลง

**เกณฑ์การประเมินจำนวนมอนอเมอร์เฉลี่ยต่อหนึ่งสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์**

ระดับ DP ถูกใช้เป็นพารามิเตอร์หลักของการประเมินฉนวนภายในหม้อแปลงและผลการทดสอบทางไฟฟ้าที่บ่งชี้ความผิดปกติของขดลวดจะถูกใช้เป็นพารามิเตอร์ทริกเกอร์ (0,1) หากตรวจพบความผิดปกติจากผลการทดสอบทางไฟฟ้า คะแนนของส่วนนี้จะถูกคูณด้วยศูนย์ และทำให้ตกชั้นที่คะแนนที่เป็นศูนย์หมายถึงวิศวกรต้องเข้าไปแก้ปัญหานั้นทันทีเพื่อทำให้หม้อแปลงกลับมาอยู่ในสภาวะปกติก่อนนำมาใช้งานต่อ

ค่า DP สามารถหาได้โดยการประมาณค่าจากสมการที่ 3-2 [19] โดยใช้ผลการวัดปริมาณสารประกอบฟูราน (2-FAL) ในน้ำมัน และการให้คะแนนของ DP ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 3.2

$$\text{Log}(2 - \text{FAL}) = 1.51 - 0.0035\text{DP} \tag{3-2}$$

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของคะแนนต่อระดับ DP

คะแนน	ค่า DP ที่คำนวณได้
4	≥700
3	≥500
2	≥400
1	≥300
0	<300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เกณฑ์การทดสอบทางไฟฟ้าทั่วไป [20]

- การตรวจวัดค่าความต้านทานความเป็นฉนวน (Insulation Resistance, IR) ดัชนีโพลาไรเซชัน (PI) จะถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ โดย PI กำหนดโดยอัตราส่วนของความต้านทานที่ 10 นาทีต่อความต้านทานที่ 1 นาที อัตราส่วนนี้ยังบ่งบอกถึงความชื้นและ/หรือการปนเปื้อนอีกด้วย PI ควรมากกว่า 1.25 และความต้านทานของฉนวนขั้นต่ำควรมากกว่า  $CE/\sqrt{kVA}$  ตามมาตรฐาน IEEE Std C57.152-2013 และเกณฑ์การให้คะแนนจะแสดงในบทที่ 4 มาก สำหรับการให้คะแนน ปัจจัยคะแนนจะเท่ากับ 1 หากค่าเป็นไปตามมาตรฐานและเป็น 0 หากพบปัญหาใดๆ
- การวัดค่าความสูญเสียทางฉนวน (Insulation Power Factor, PF) ของฉนวนหลักระหว่างขดลวดและขดลวดถึงพื้นสามารถบ่งบอกถึงความชื้นและ/หรือการปนเปื้อนในระบบฉนวนระหว่างขดลวดถึงขดลวดหรือขดลวดถึงพื้น โดยทั่วไป ค่าที่วัดได้มากกว่า 0.5% ถือว่าฉนวนเสื่อมสภาพ และค่าที่มากกว่า 1% ถือว่าแย่มาก สำหรับการให้คะแนน ปัจจัยคะแนนจะเท่ากับ 1 หากค่าเป็นไปตามมาตรฐานและเป็น 0 หากพบปัญหาใดๆ
- การวัดอัตราส่วนของหม้อแปลง (Ratio and Polarity) อัตราส่วนรอบเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากขดลวดหนึ่งไปยังอีกขดลวดหนึ่ง อัตราส่วนควรแตกต่างกันไม่เกิน 0.5% จากที่คำนวณได้จากเนมเพลต ปัญหาอัตราส่วนเป็นตัวบ่งชี้การลัดวงจรหรือวงจรเปิด สำหรับการให้คะแนน ปัจจัยคะแนนจะเท่ากับ 1 หากทำงานได้ตามปกติ และเป็น 0 หากพบปัญหาใดๆ
- การวัดกระแสกระตุ้น (Exciting Current) กระแสกระตุ้นเป็นการวัดคุณลักษณะแกนกลาง แต่ยังสามารถได้รับอิทธิพลจากการลัดวงจร โดยปกติเฟสภายนอกจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ 5% กระแสไฟฟ้าในเฟสกลางสามารถลดลงได้สูงสุดถึง 30% (รูปแบบสูง - ต่ำ - สูง) สำหรับการให้คะแนน ปัจจัยคะแนนจะเท่ากับ 1 หากทำงานได้ตามปกติ และเป็น 0 หากพบปัญหาใดๆ
- การวัดความต้านทานของขดลวด (Winding Resistance) ความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงจะถูกวัดเพื่อตรวจสอบความผิดปกติเนื่องจากจุดเชื่อมต่อที่ไม่สมบูรณ์ ตัวนำขาด หรือความต้านทานต่อการสัมผัสสูงในตัวเปลี่ยนแทป โดยทั่วไปผลลัพธ์จะถูกตีความโดยอิงจากการเปรียบเทียบการวัดที่ทำแยกกันในแต่ละเฟสของขดลวดที่เชื่อมต่อกับสตาร์ หรือระหว่างคู่สำหรับวงจรเดลต้า อาจทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลเดิมที่วัดในโรงงานด้วย ความต้านทานระหว่างเฟสควรอยู่ภายใน 2% ปัจจัยคะแนนจะเท่ากับ 1 หากทำงานได้ตามปกติ และเป็น 0 หากพบปัญหาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

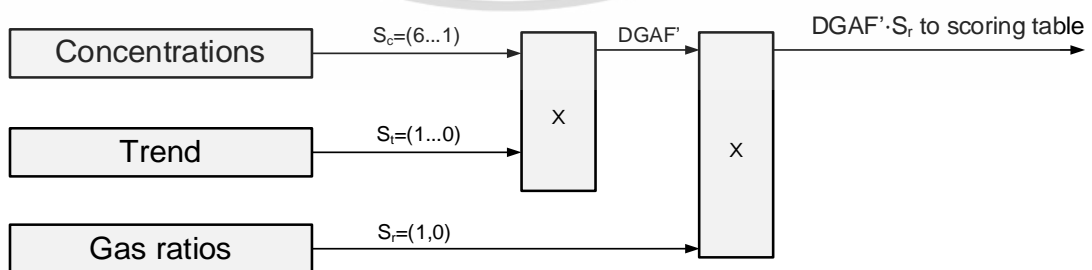
- ความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับหรืออิมพีแดนซ์ (Impedance, Z) มีสองวิธีในการทดสอบความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ:
  - ความต้านทานเฟสเดียว: ความต้านทานที่วัดได้จะต้องอยู่ภายใน 3% (% ส่วนเบี่ยงเบนสูงสุด =  $[(Z \text{ สูงสุด} - Z \text{ ต่ำสุด}) \times 100] / Z \text{ ต่ำสุด}$ ) ของผลลัพธ์ที่ได้รับก่อนหน้านี้อันและ/หรือเปรียบเทียบกับเฟสอื่น [3]
  - ความต้านทานสามเฟส: สำหรับหม้อแปลงสามเฟส ผลการทดสอบที่เทียบเท่าสามเฟสควรอยู่ภายใน 3% (% ส่วนเบี่ยงเบน =  $(Z \text{ ที่วัดได้} / Z \text{ จากเนมเพลต}) \times 100$ ) ของค่าจากเนมเพลต

ปัจจัยคะแนนจะเท่ากับ 1 หากทำงานได้ตามปกติ และเป็น 0 หากพบปัญหาใดๆ

- Core to ground เป็นวัดความต้านทานของฉนวนที่คั่นแกนเหล็กเทียบกับกราวด์ ความต้านทานของฉนวนควรมากกว่า 500 เมกะโอห์ม (Mohm) สำหรับหม้อแปลงใหม่ ความต้านทานของฉนวนควรมากกว่า 100 Mohm สำหรับหม้อแปลงที่ใช้งานอยู่

**การวิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA)**

การคำนวณคะแนน DGA จะพิจารณาจากระดับความเข้มข้น (Concentrations) อัตราการเพิ่มของแก๊ส (Trend) และอัตราส่วนของแก๊ส (Gas Ratio) แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 การให้คะแนนระดับความเข้มข้นของแก๊ส (DGAF) ซึ่งเป็นเกณฑ์ความเข้มข้นของแก๊สตามแบบจำลองที่ Kinectrics ให้ไว้ โดยทั่วไปจะใช้แบบจำลองนี้ในการประเมินเพื่อกำหนดดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจะถูกใช้ในการประเมินนี้ เกณฑ์การให้คะแนนแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 แก๊สแต่ละตัวที่ถูกให้คะแนนตามลำดับความเข้มข้นแล้วจะถูกนำไปคูณด้วยน้ำหนัก ( $W_i$ ) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 เช่นกัน (ขั้นตอนนี้เป็นเพื่อให้มีความสำคัญกับแก๊สที่บ่งบอกถึงความอันตราย หากมีความเข้มข้นสูงน้ำหนักตัวคูณก็จะสูงตาม) จากนั้นคะแนน DGAF จะถูกคำนวณตามสมการที่ 3-3



รูปที่ 3.10 แผนผังวิธีคำนวณคะแนนสถานะของ DGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์การให้คะแนนและน้ำหนักตัวคูณสำหรับระดับความเข้มข้นของแก๊ส

Gas	Score ( $S_i$ )						Weighting ( $W_i$ )
	6	5	4	3	2	1	
H <sub>2</sub>	≤100	100-200	200-300	300-500	500-700	≥700	2
CO	≤350	350-700	700-900	900-1100	1100-1400	≥1400	1
CO <sub>2</sub>	≤2500	≤3000	≤4000	≤5000	≤7000	≥7000	1
CH <sub>4</sub>	≤75	75-125	125-200	200-400	400-600	≥600	3
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	≤50	50-80	80-100	100-150	150-200	≥200	3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	≤65	65-80	80-100	100-120	120-150	≥150	3
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	≤3	3-7	7-35	35-50	50-80	≥80	5

$$DGAF = \frac{\sum_{i=1}^7 S_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^7 W_i} \quad (3-3)$$

แนวโน้มหรืออัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สคำนวณตามมาตรฐาน IEC 60599-2015 [21] ค่าผลลัพธ์จะเป็นตัวคูณตั้งแต่ 0 ถึง 1 เป็นคะแนนที่จะทำหน้าที่ปรับลดคะแนนที่ได้จากระดับความเข้มข้น เนื่องจากระดับแก๊สที่เพิ่มขึ้นเกินเกณฑ์มาตรฐานจะส่งสัญญาณถึงความผิดปกติที่กำลังดำเนินอยู่แม้ระดับแก๊สจะมีปริมาณต่ำก็ตาม การคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สจะขึ้นอยู่กับข้อมูลการเพิ่มขึ้นของแก๊สซึ่งเพิ่มขึ้นทุกปีและถูกคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าความเข้มข้นทั่วไป (Typical Value) [8] อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สคำนวณตามสมการที่ 3-4 ตัวคูณลด (TF) คำนวณเป็นค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของคะแนนแก๊สแต่ละรายการตามสมการที่ 3-5 ผลลัพธ์จะเป็นตัวเลขระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งนำไปคูณกับคะแนน DGAF เพิ่มเติมเพื่อปรับตามแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของแก๊สดังแสดงในสมการที่ 3.6

เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับอัตราการเพิ่มแก๊สแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 การให้น้ำหนัก ( $W_i$ ) ของแก๊สแต่ละชนิดจะใช้ค่าเดียวกันกับการน้ำหนักของระดับระดับความเข้มข้น ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เกณฑ์การให้คะแนนและน้ำหนักตัวคูณสำหรับระดับความเข้มข้นของแก๊ส

$$R = \left( \frac{S_T - S_0}{TV} \right) \times \left( \frac{365}{T_T - T_0} \right) \times 100 \quad (3-4)$$

$$TF = \frac{\sum_{i=1}^7 S_i \cdot W_i}{4 \cdot \sum_{i=1}^7 W_i} \quad (3-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$DGAF' = DGAF \cdot TF \quad (3-6)$$

เมื่อ

$R$	อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส (ไมโครลิตร/ลิตร/ปี)
$S_T$	ตัวอย่างที่สอง (ไมโครลิตร/ลิตร)
$S_0$	ตัวอย่างแรก (ไมโครลิตร/ลิตร)
$T_T$	เวลาของตัวอย่างที่สอง (วัน)
$T_0$	เวลาของตัวอย่างแรก (วัน)
$TV$	ระดับความเข้มโดยทั่วไปของแก๊สแต่ละชนิดที่ระบุใน IEC 60599

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส

คะแนน	อัตราการเพิ่มขึ้น ใน 1 ปี [%/year]	อัตราการเพิ่มขึ้น ใน 3 ปี [%/year]	อัตราการเพิ่มขึ้น ใน 5 ปี [%/year]
4	<30		
3	<60		
2	<90	>30	
1	<120	>60	>30
0	≥120	>90	>60

อัตราส่วนแก๊สใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊ส และสามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ โดยปกติ หากการวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊สบ่งชี้ถึงความผิดปกติขั้นรุนแรง จำเป็นต้องดำเนินการแก้ไขทันทีเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะตามมา อัตราส่วนแก๊สถูกกำหนดเป็นตัวคูณเป็น 0 หรือ 1 ซึ่งส่งผลให้คะแนนดัชนีสุขภาพลดลงเป็นศูนย์ทันทีหากการวิเคราะห์บ่งชี้ถึงความผิดปกติ จากนั้นตัวคูณนี้จะถูกคูณกับ  $DGAF'$  ซึ่งได้กล่าวถึงในส่วนก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องปฏิบัติตามลำดับเกณฑ์ของมาตรฐานก่อนดำเนินการวิเคราะห์อัตราส่วน โดยมาตรฐานที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้คือ IEEE C57-104-2019 (Roger, Donenberg) และ IEC 60599:2015 (Duval)

รูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นการคำนวณคะแนน  $DGAF'$  ที่คำนึงถึงระดับความเข้มข้น อัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สซึ่งเป็นตัวคูณลด (TF) และตัวคูณลดจากการวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊ส (Gas Ratio) จากนั้นจึงเปรียบเทียบคะแนนนี้ ( $DGAF'$  ที่ถูกคูณด้วยคะแนน Gas ratio แล้ว) กับข้อมูลในตารางที่ 3.5 เพื่อให้ได้คะแนนสถานะสุดท้าย

ตารางที่ 3.5 การให้คะแนนสถานะของการวิเคราะห์แก๊สในน้ำมัน

คะแนนสถานะ	สถานะ	เกณฑ์
4	Good	$DGAF' > 5.8$
3	Acceptable	$5.8 \geq DGAF' > 5.5$
2	Need Caution	$5.5 \geq DGAF' > 5$
1	Poor	$5 \geq DGAF' > 4$
0	Very poor	$DGAF' \leq 4$

### การประเมินคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงจากหัวข้อการทดสอบทางเคมีและทางไฟฟ้า

คะแนนสถานะของคุณภาพน้ำมัน ได้มาจากการประเมินคุณสมบัติซึ่งการให้คะแนนคุณสมบัติต่างๆของน้ำมัน ( $S_i$ ) และตัวคูนน้ำหนัก ( $W_i$ ) แสดงในตารางที่ 3.6 ซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐาน IEEE [22] เนื่องจากมาตรฐานการทดสอบส่วนใหญ่ใช้มาตรฐาน ASTM ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับมาตรฐาน IEEE จากนั้นคะแนนคุณสมบัติ (OQF) จะถูกคำนวณตามสมการที่ 3.7 จากนั้นคะแนนคุณสมบัติจะถูกนำไปเปรียบเทียบในตารางที่ 3.7 เพื่อหาคะแนนสถานะของน้ำมัน

$$OQF = \frac{\sum_{i=1}^7 S_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^7 W_i} \quad (3-7)$$

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์การให้คะแนนและน้ำหนักสำหรับพารามิเตอร์คุณภาพน้ำมัน

พารามิเตอร์การทดสอบน้ำมัน	$U \leq 69$ kV	$69 \text{ kV} < U < 230$ kV	$230 \text{ kV} \leq$ U	Score ( $S_i$ )	Weight ( $W_i$ )
Dielectric Strength [kV] (2mm gap)	$\geq 45$	$\geq 52$	$\geq 60$	4	3
	35-45	47-52	50-60	3	
	30-35	35-47	40-50	2	
	$\leq 30$	$\leq 35$	$\leq 40$	1	
Interfacial tension [dyne/cm]	$\geq 25$	$\geq 30$	$\geq 32$	4	2
	20-25	23-30	25-32	3	
	15-20	28-23	20-25	2	
	$\leq 15$	$\leq 18$	$\leq 20$	1	
Acid number [mg KOH/g oil]	$\leq 0.05$	$\leq 0.04$	$\leq 0.03$	4	1
	0.05-0.1	0.04-0.1	0.03-0.07	3	
	0.1-0.2	0.1-0.15	0.07-0.1	2	
	$\geq 0.2$	$\geq 0.15$	$\geq 0.1$	1	
Water content [ppm]	$\leq 30$	$\leq 20$	$\leq 15$	4	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์การทดสอบน้ำมัน	U≤69 kV	69 kV<U<230 kV	230 kV ≤ U	Score (S <sub>i</sub> )	Weight (W <sub>i</sub> )
	30-35	20-25	15-20	3	
	35-40	25-30	20-25	2	
	≥40	≥30	≥30	1	
Dissipation factor [%] (at 25°C)	≤0.1			4	3
	0.1-0.5			3	
	0.5-1.0			2	
	≥1.0			1	
Passivator content [mg/kg]	>90			4	1
	>70			3	
	>50			2	
	≤50			1	
Corrosivity	Non-corrosive			4	4
	Corrosive			1	

ตารางที่ 3.7 เกณฑ์การให้คะแนนสถานะของฉนวนเหลว

คะแนนสถานะของน้ำมัน	สถานะ	เกณฑ์
4	Good	QQF>3.6
3	Acceptable	3.6≥QQF>3.2
2	Need Caution	3.2≥QQF>2.8
1	Poor	2.8≥QQF>2.4
0	Very poor	QQF≤ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

การประเมินนี้จะนำเสนอเพื่อประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า การประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวนแข็งจะดำเนินการโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาโดย SINTEF Energy Research โดยเชื่อว่าแบบจำลองนี้อธิบายการย่อยสลายของเซลลูโลสในลักษณะที่ค่อนข้างแม่นยำ โดยใช้ความรู้ขั้นสูงเกี่ยวกับกลไกการย่อยสลายของฉนวนแข็ง

แบบจำลองนี้ใช้ข้อมูลตามประวัติโหลดและอุณหภูมิตลอดทั้งปีซึ่งการเลือกข้อมูลปีซึ่งเป็นโหลดรายปีที่สูงที่สุด เมื่อปีของชุดข้อมูลถูกเลือกแล้ว จากนั้นอุณหภูมิฮอตสปอต (Hot-Spot) รายชั่วโมงของปีนั้นจะถูกคำนวณจากข้อมูลอุณหภูมิขดลวดรายชั่วโมงตามมาตรฐาน IEC 60076-7 [18] จากนั้นจำนวนการตัดสายโซ่ของเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษ ( $\eta$ ) ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิฮอตสปอตของแต่ละชั่วโมงจะถูกคำนวณตามสมการที่ 3-8 โดยค่าคงที่ที่นำมาแทนลงในสมการจะถูกกำหนดตามตารางที่ 3.8 ปริมาณความชื้นในกระดาษซึ่งมาจากการประมาณด้วยโมเดล X-Y จากการวัดด้วย FDS และปริมาณออกซิเจนภายในน้ำมันหม้อแปลงซึ่งได้มาจากการทำ DGA [16] จากนั้นค่า DP ของกระดาษในชั่วโมงถัดไปจะถูกคำนวณตามสมการที่ 3-9 การคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะถูกคำนวณเป็นรูปจวนครบ 8,760 ชั่วโมง (1 ปี) จากนั้น ค่า DP ในชั่วโมงที่ 1 (ต้นปี) และชั่วโมงที่ 8760 (ท้ายปี) จะถูกนำมาแทนในสมการที่ 3-10 เพื่อคำนวณหาตัวแทนข้อมูลของอัตราการเสื่อมสภาพในปีนั้น จากตัวแทนข้อมูลของอัตราการเสื่อมสภาพของปีนั้นค่าดังกล่าวจะถูกนำมาคำนวณค่า DP ในปีถัดๆ ไป จบค่า DP ต่ำกว่า 300 แผนผังของการคำนวณแสดงในการประเมินหาอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.11

$$\eta = DP_{new} \cdot \left( A_{Oxi} e^{\frac{-E_{Oxi}}{RT}} + A_{Hyd} e^{\frac{-E_{Hyd}}{RT}} \right) \cdot t \quad (3-8)$$

$$\eta = \frac{DP_{new}}{DP_t} - 1 \quad (3-9)$$

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = k \cdot t \quad (3-10)$$

$\eta$	จำนวนเฉลี่ยของการแยกสายโซ่ที่เกิดขึ้นสำหรับโมเลกุลเซลลูโลสในฉนวนแข็ง
$DP_{new}$	ค่า DP เริ่มต้นของฉนวนซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 1,000
$k$	อัตราการเสื่อมสภาพ [1/h]
$A$	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับการสภาพแวดล้อมทางเคมี [ $\text{time}^{-1}$ ]
$E$	พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา [kJ/mol]
$R$	ค่าคงที่ของโมเลกุลแก๊ส 8.314 [J/mol/K]
$T$	อุณหภูมิ Hot-Spot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t$  เวลา

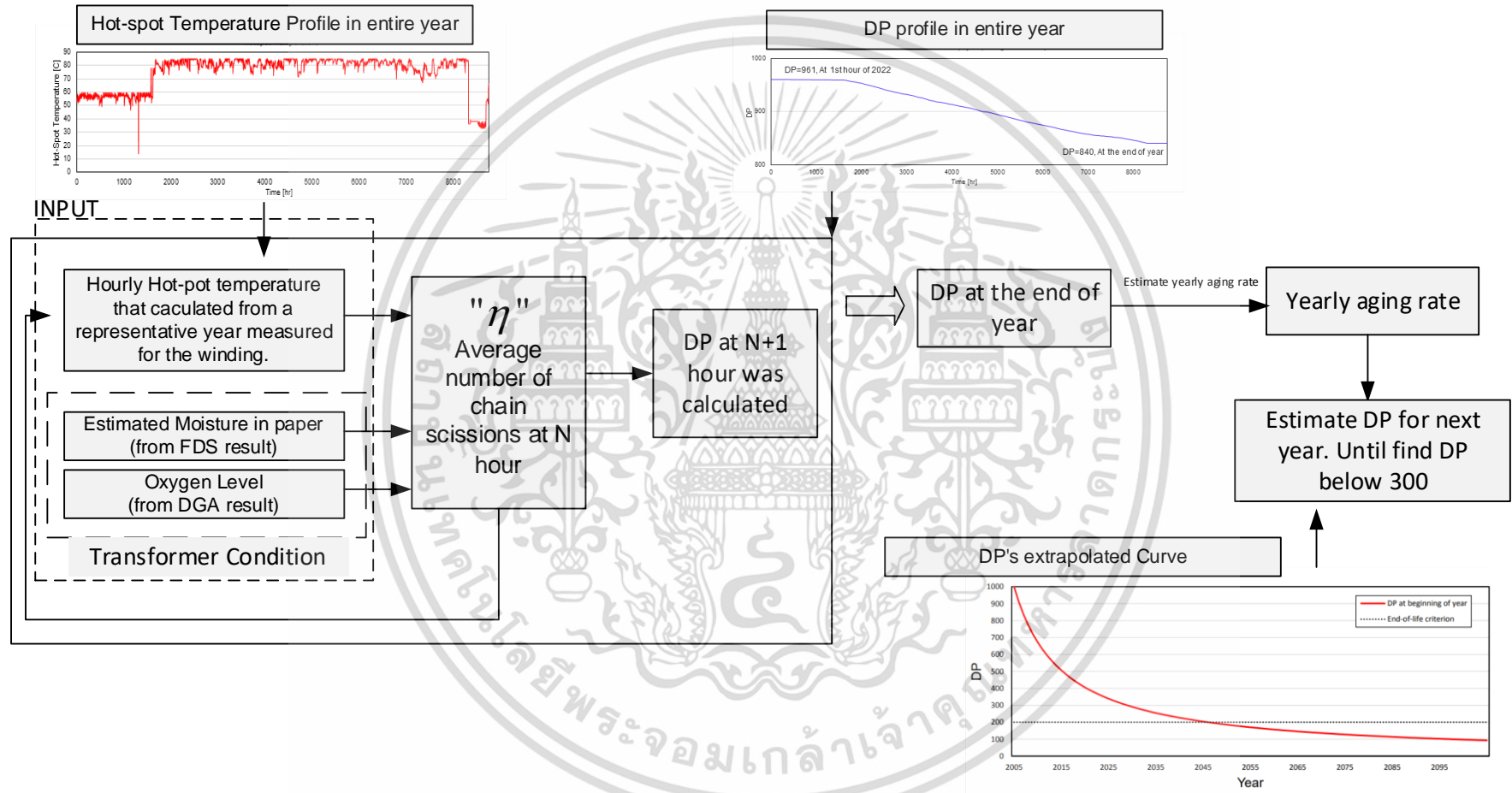
ตารางที่ 3.8 พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E) และค่าคงที่ขึ้นอยู่กัสภาพแวดล้อมทางเคมี (A) สำหรับการคำนวณการย่อยสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสกระดาษ Thermal Upgrade [16]

ค่าคงที่	ความชื้น<0.5%, ปริมาณออกซิเจนต่ำ	ความชื้น 0.5-2.0%	ความชื้น $\geq 2\%$	ความชื้น<0.5%, ปริมาณออกซิเจนสูง
E	86	86	86	89 *
A	$1.6 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^4$	$6.1 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot 10^4$ *

หมายเหตุ -ปริมาณออกซิเจนต่ำคือมีค่าน้อยกว่า 7000 ppm

- หากออกซิเจนมีค่าต่ำ  $A_{Oxi}$  และ  $E_{Oxi}$  จะมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมภาพรวมของการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 3.3 รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการประเมินและข้อมูลผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลผลการทดสอบจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 122/175 MVA 115 KV – 15.75 KV จะถูกนำมาเพื่อประเมินหาดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 3.9 สรุปผลการทดสอบทางไฟฟ้าในหัวข้อต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบ Frequency Domain Spectroscopy แสดงในรูปแบบที่ 3.12 และตารางที่ 3.12 ผลการทดสอบ DGA ในช่วงเวลา 1 ปีล่าสุดแสดงในตารางที่ 3.13 การวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊สแสดงในตารางที่ 3.13 และผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันในหัวข้อต่างแสดงในตารางที่ 3.15 กราฟของโหลดรายชั่วโมงในปีที่เลือกมาใช้ในการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงในรูปแบบที่ 3.13 และกราฟของอุณหภูมิขดลวดในปีเดียวกันแสดงในรูปแบบที่ 3.14

ตารางที่ 3.9 รายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกนำมาเพื่อประเมิน

ระบบการระบายความร้อน	ONAN / OFAF
ข้อมูลทางไฟฟ้า	3Ø, 50 Hz, 879 A / 6915 A, Dyn1
ปีที่ผลิต	2010
เวลาที่เริ่มใช้งาน	Jan 2011
ช่วงเวลาที่ถูกใช้งาน	13
คลาสของฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า	Thermal Upgrade, คลาส E (120 °C)
คุณสมบัติไฟของน้ำมัน	น้ำมันแร่, คลาส O (อุณหภูมิติดไฟ 170 -180 °C)

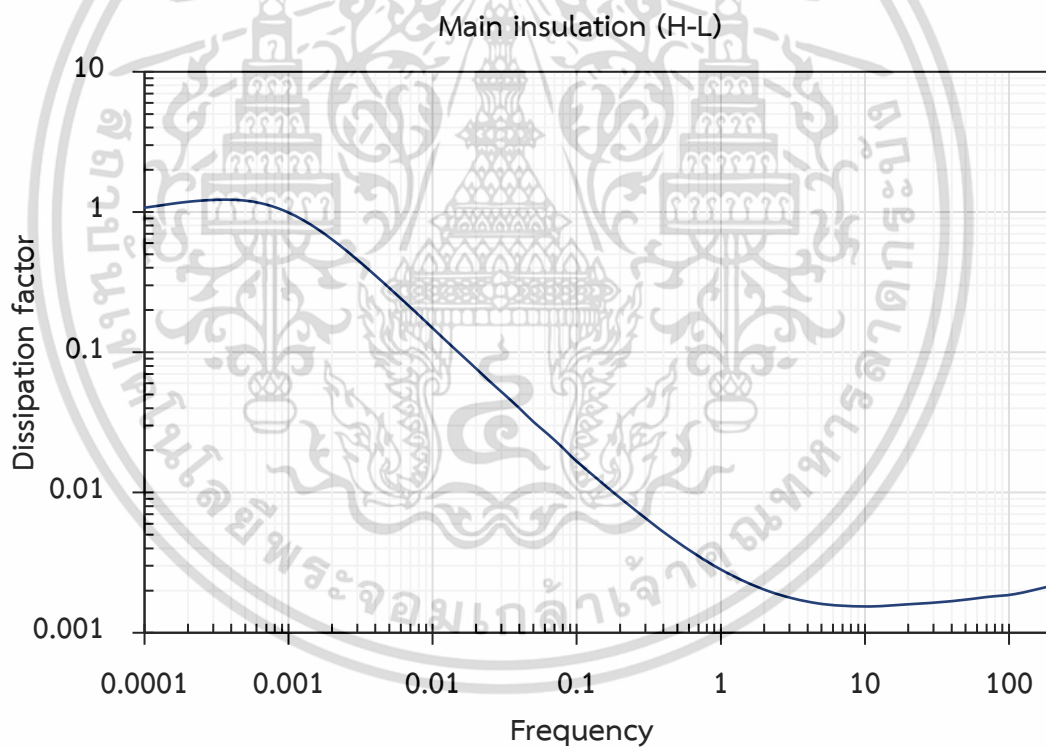
ตารางที่ 3.10 สรุปผลการทดสอบทางไฟฟ้า

Insulation Resistance and PI		IR [Mohm]	PI
Primary Winding to Ground		4,620	1.75
Secondary Winding to Ground		2,466	1.93
Primary to Secondary Winding		16,900	1.816
Insulation Power Factor [%]			
Primary to Secondary Winding	Secondary Winding to Ground	Primary Winding to Ground	
0.1756	0.2440	0.1725	
Ratio and Polarity		Deviation based on nameplate < 0.13%	
Exciting Current		High-Low-High pattern	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 (ต่อ) สรุปผลการทดสอบทางไฟฟ้า

Winding Resistance Test	Deviation between phases < 1.0%		
Impedance	Deviation [%]		
	Tap		
	1	9	17
Single Phase Impedance	0.016	0.140	0.233
Three Phase Impedance	0.044	0.020	0.005
Core to ground	Core-G [Mohm]	Camp-G [Mohm]	Core-Camp [Mohm]
	10690	10370	4670



รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบ FDS ของส่วนฉนวนหลักในหม้อแปลงแสดงผลในรูปแบบขององค์ประกอบ ความสูญเสียในช่วงความถี่ 0.1 mHz-200 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.12 ผลการทดสอบและพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการทดสอบ FDS

NO.	Analysis Item		Results
1.	Mineral Oil	Conductivity at 20°C	pS/m 0.121
		Relative permittivity at 20°C (dipolar pol)	2.2
2.	Pressboard Paper	Estimated moisture content	%wt 0.7
		Estimated moisture saturation	%wt 1.0
4.	Bubbling inception temperature (reducing PDIV level)		°C 181
5.	C 50 Hz	HV to LV Windings	pF 12,713
6.	C ratio	C (10 mHz)/ C (50 Hz)	1.014

ตารางที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน (ถังหลัก)

Test date	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	TDCG
May 18, 2023	2569	625	6	11	0	7	3	4098	35661	652
Apr 11, 2023	3624	1061	7	18	0	9	3	6712	55825	996
Oct 05,2022	3632	1052	7	18	0	9	3	8193	30365	1089
Mar 28, 2022	4364	1518	5	26	0	10	4	9871	21841	1563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

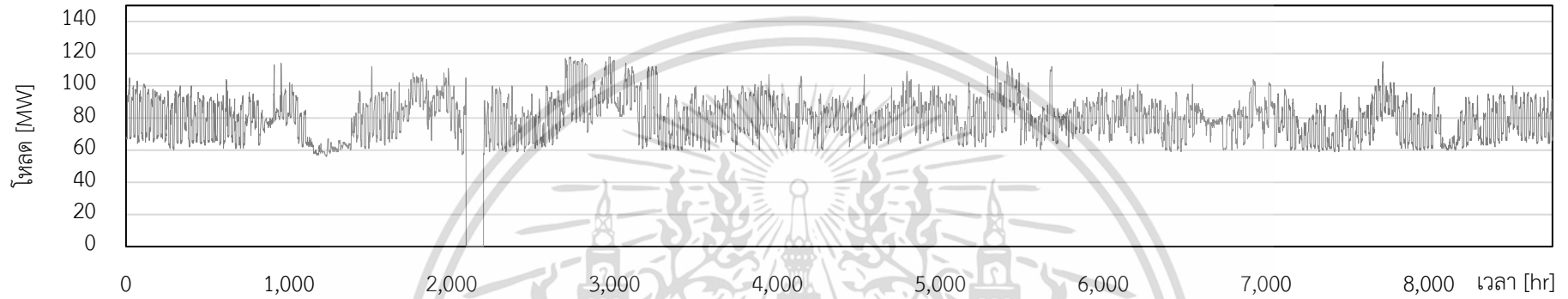
ตารางที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนแก๊สตามมาตรฐาน IEC 60599-2015

Ratio	Result
O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	0.11 (Normal) (0.3-0.5 is acceptable, Since the transformer undergoes De-gassing, the values are within Normal)
CO <sub>2</sub> /CO	4.11 (Normal) (3-10 is acceptable)
Fault identified	No fault detects (All gas below typical values of gas concentration and rates of gas increase)
Annotation:	Interpretive method based on IEEE C57-104-2019 (Roger, Donenberg) and IEC 60599:2015 (Duval)

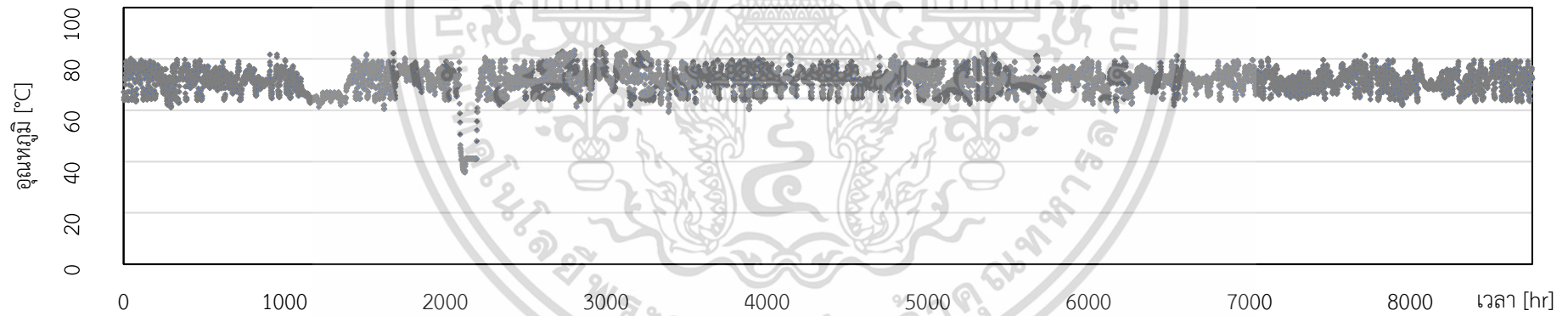
ตารางที่ 3.15 ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

Parameter	Test Result
Dielectric Strength [kV] (2mm gap)	68
Interfacial tension [mN/m]	39
Acid number [mgKOH/g]	0.022
Water content in oil [ppm]	12 ppm
Dissipation factor [%] (at 25°C)	0.002 at 25°C 0.300 at 100°C
Passivator content [mg/kg]	<5
Corrosivity	Non-Corrosive
Furan in insulating liquids [ppm]	5-HMF (Not Detectable), 2-FOL (<5), 2-FAL (14), 2-ACF (10), 5-MEF (<5)
Dibenzyl disulphide content [ppm]	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 โหลดรายชั่วโมงในปีที่เลือกมาใช้ในการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 อุณหภูมิรายชั่วโมงของขดลวดแรงต่ำของปีที่ถูกเลือก

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

##### 4.1.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบการทดสอบองค์ประกอบความชื้นของตัวอย่างที่ใช้น้ำมันแร่

ทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบการวัดปริมาณความชื้นจากสองวิธีการคือ Coulometric Karl Fisher ซึ่งเป็นวิธีการตรงในการหาองค์ประกอบความชื้น และจากการหาเส้นโค้งที่เหมาะสมเพื่อประมาณองค์ประกอบความชื้นด้วยวิธีการ X-Y Model ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการทดสอบ FDS ซึ่งเป็นวิธีการวัดทางไฟฟ้าสามารถให้ค่าองค์ประกอบความชื้นใกล้เคียงกับผลจากการวัดโดยตรง โดยมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยซึ่งวัดด้วยวิธีการ Coulometric Karl Fisher ไม่เกิน 0.1%

ตารางที่ 4.1 ทดสอบการทดสอบองค์ประกอบความชื้นของตัวอย่างที่ใช้น้ำมันแร่

ตัวอย่างทดสอบ	การอบเพรสบอร์ดด้วยความร้อน 150 องศาเซลเซียส	การอิมเพรกเนต	องค์ประกอบความชื้นในเพรสบอร์ด [% wt.]				
			Coulometric Karl Fisher				FDS
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
1 (MO)	0 วัน	0 ชั่วโมง	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8
2 (MO)		8 ชั่วโมง	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
3 (MO)		16 ชั่วโมง	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6
4 (MO)		24 ชั่วโมง	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5 (MO)	30 วัน	0 ชั่วโมง	5.0	5.1	5.0	5.0	5.0
6 (MO)		8 ชั่วโมง	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0
7 (MO)		16 ชั่วโมง	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8
8 (MO)		24 ชั่วโมง	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9
9 (MO)	90 วัน	0 ชั่วโมง	7.1	7.2	7.2	7.1	7.3
10 (MO)		8 ชั่วโมง	6.5	6.7	6.7	6.6	6.5
11 (MO)		16 ชั่วโมง	6.0	5.9	6.2	6.0	6.0
12 (MO)		24 ชั่วโมง	5.9	5.7	5.6	5.7	5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

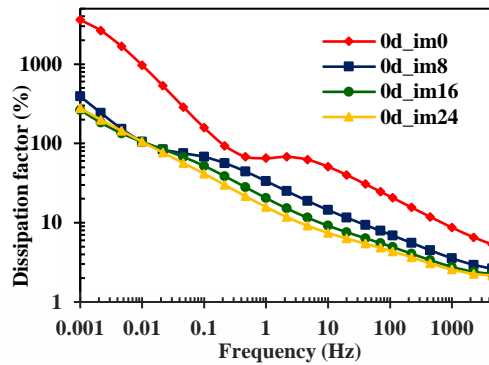
#### 4.1.2 ผลการทดสอบการทดสอบสเปคโตรสโคปีในโดเมนความถี่ของตัวอย่างซึ่งถูกอิมเพรกเนตและถูกทำให้เสื่อมสภาพด้วยน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ

ผลการทดสอบการวัด FDS ของเพรสบอร์ดที่ไม่ผ่านการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนซึ่งถูกอิมเพรกเนตด้วยเอสเทอร์ธรรมชาติในช่วงเวลาต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 4.1 ผลการทดสอบในรูปที่ 4.1(ก) แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการอิมเพรกเนตมีผลอย่างมากต่อองค์ประกอบความสูญเสีย (Tan  $\delta$ ) สำหรับเพรสบอร์ดที่ไม่ต้องใช้ความร้อนซึ่งอิมเพรกเนตไว้น้อยกว่า 8 ชั่วโมง จะมีโหนดเกิดขึ้นในเส้นโค้งองค์ประกอบความสูญเสีย นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าเวลาในการอิมเพรกเนตจะส่งผลต่อตำแหน่งของความถี่ที่โหนดเกิดขึ้นก่อนแทนที่จะเป็นค่าสูงสุดที่แตกต่างกัน และตำแหน่งโหนดจะเลื่อนไปยังความถี่สูงขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ไม่มีการอิมเพรกเนต

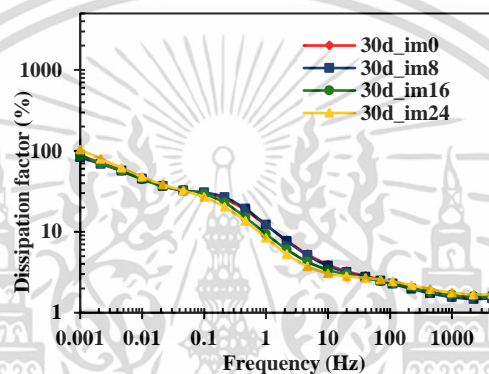
ที่อุณหภูมิสูง ความเครียดจากความร้อนส่งผลให้ฉนวนเสื่อมสภาพจากความร้อน เนื่องจากความเสถียรที่อุณหภูมิสูงของน้ำมัน NE ทำให้กระบวนการอิมเพรกเนตอาจดำเนินต่อไปในขณะที่ตัวอย่างอยู่ภายใต้ความเครียดจากความร้อน (อุณหภูมิมาก 150 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดเส้นโค้งที่ทับซ้อนกัน อย่างไรก็ตาม ในรูปที่ 4.1(ข) สำหรับตัวอย่างภายใต้ความเครียดจากความร้อนเป็นเวลา 30 วัน การตอบสนองในช่วงความถี่ 0.1-1 Hz จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลจากคุณลักษณะของการนำน้ำมัน [11]

รูปที่ 4.1(ค) แสดงผลการทดสอบของเพรสบอร์ดที่อิมเพรกเนตด้วยธรรมชาติภายใต้ความเครียดจากความร้อนเป็นเวลา 90 วัน เส้นโค้งการตอบสนองของตัวอย่างทั้งหมดทับซ้อนกันเกือบทั้งหมดตลอดช่วงความถี่ของการวัด

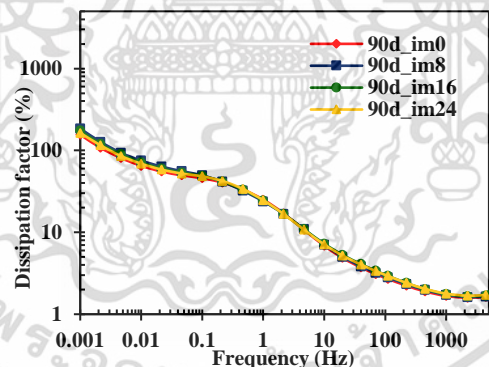
เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างซึ่งมีเวลาในการอิมเพรกเนตที่เท่ากัน ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.2 ในรูปที่ 4.2(ก) แสดงการตอบสนองของตัวอย่างเพรสบอร์ดที่ไม่อิมเพรกเนตภายใต้ความเครียดจากความร้อนเป็นเวลา 30 วัน ซึ่งเส้นโค้งที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงความถี่ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทำให้เสื่อมสภาพด้วยความร้อน ตำแหน่งความถี่ของโหนดและค่าจุดสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงไป การตอบสนองที่ความถี่ต่ำของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เสื่อมสภาพบ่งชี้ว่าสภาพของเพรสบอร์ดดีขึ้น จากนั้นหลังจาก 90 วันของการทำให้เสื่อมสภาพด้วยความร้อนจะสามารถสังเกตการเสื่อมสภาพของเซลล์โลสและปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในเพรสบอร์ด จากการยกตัวขึ้นของเส้นโค้ง เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งของตัวอย่างที่ 30 วัน



(ก) ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเสื่อมสภาพจากความร้อน



(ข) ตัวอย่างที่ผ่านการเสื่อมสภาพจากความร้อนเป็นเวลา 30 วัน



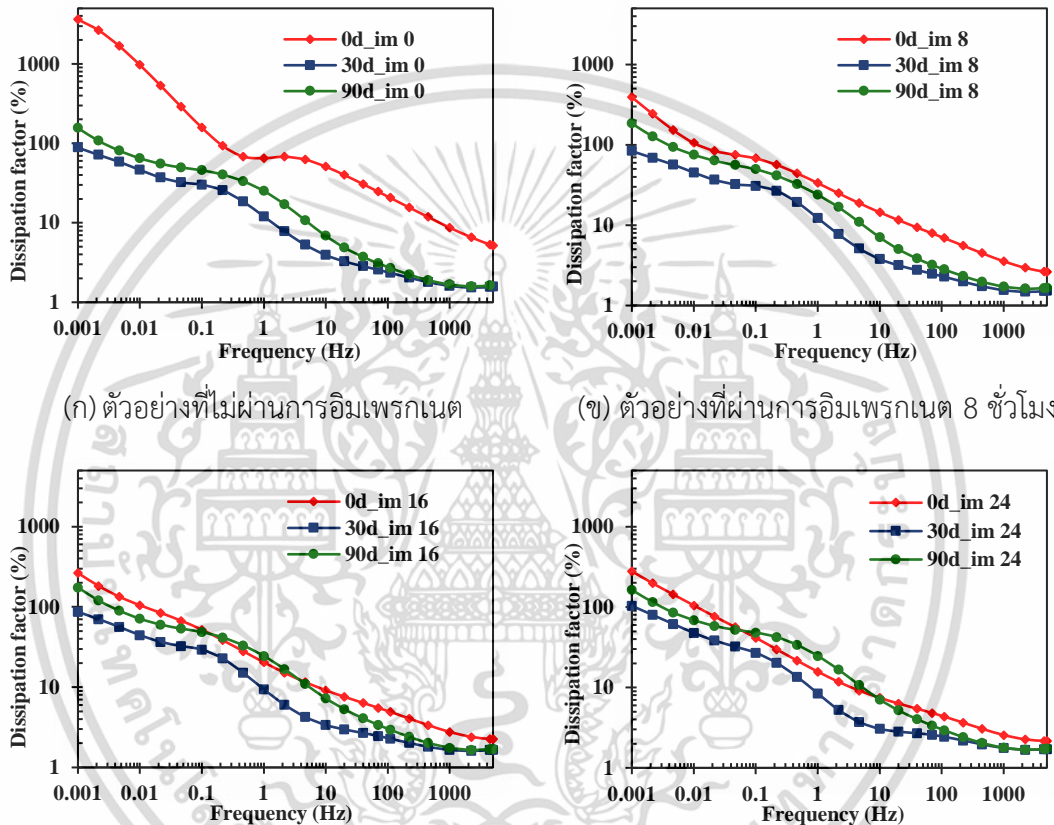
(ค) ตัวอย่างที่ผ่านการเสื่อมสภาพจากความร้อนเป็นเวลา 90 วัน

รูปที่ 4.1 เส้นโค้ง FDS ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตซึ่งถูกทำให้เสื่อมสภาพภายใต้ความเครียดจากความร้อนในเวลาที่เท่ากัน แต่มีระยะเวลาในการอิมเพกเนตที่ต่างกัน

สำหรับเวลาในการอิมเพกเนต 8 ชั่วโมงขึ้นไป แสดงดังรูปที่ 4.2(ข) การตอบสนองของตัวอย่างภายใต้ความเครียดจากความร้อนเป็นเวลา 30 (30d\_im8) วันมีแนวโน้มที่จะปรับปรุงสภาพของของเพรสบอร์ดให้ดีขึ้นเนื่องจากเส้นโค้งลดตัวลงตลอดช่วงความถี่และมีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทำให้เสื่อมสภาพด้วยความร้อน (0d\_im8) และจะเริ่มแสดงการเสื่อมสภาพหลังจาก 90 วัน อย่างไรก็ตามเส้นโค้งของตัวอย่างที่ 90 (90d\_im8) วันภายใต้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดจากความร้อน กราฟการตอบสนองมีแนวโน้มที่จะมีสภาพความเป็นฉนวนที่ดีกว่าในตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมสภาพ (0d\_im8)

ในรูปที่ 4.2(ค) และ รูปที่ 4.2(ง) เส้นโค้งองค์ประกอบความสูญเสียของตัวอย่างที่อิมเพกเนตเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ กราฟการตอบสนองของตัวอย่าง 90 วัน (90d\_im16 และ 90d\_im24) ตัดกับกราฟการตอบสนองของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทำให้เชื่อมสภาพด้วยความร้อน (0d\_im16 และ 0d\_im24) ในช่วงความถี่ 0.1-10 Hz



(ก) ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอิมเพกเนต

(ข) ตัวอย่างที่ผ่านการอิมเพกเนต 8 ชั่วโมง

(ค) ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอิมเพกเนต 16 ชั่วโมง

(ง) ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการอิมเพกเนต 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.2 เส้นโค้ง FDS ของเพรสบอร์ดที่อิมเพกเนตในเวลาเท่ากัน แต่มีระยะเวลาในการถูกทำให้เชื่อมสภาพจากความร้อนที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบการทดสอบองค์ประกอบความชื้นของตัวอย่างที่ใช้ น้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ

ตัวอย่างทดสอบ	การอบเพรสบอร์ตด้วยความร้อน 150 องศาเซลเซียส	การอิมเพรกเนต	องค์ประกอบความชื้นในเพรสบอร์ต [% wt.]				
			Coulometric Karl Fisher				FDS
			1	2	3	ค่าเฉลี่ย	
13 (NE)	0 วัน	0 ชั่วโมง	3.5	3.7	3.7	3.6	3.4
14 (NE)		8 ชั่วโมง	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3
15 (NE)		16 ชั่วโมง	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1
16 (NE)		24 ชั่วโมง	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1
17 (NE)	30 วัน	0 ชั่วโมง	4.9	4.9	4.8	4.9	5.3
18 (NE)		8 ชั่วโมง	4.9	4.8	4.9	4.9	5.3
19 (NE)		16 ชั่วโมง	5.1	5.2	5.1	5.1	5.2
20 (NE)		24 ชั่วโมง	5.2	5.3	5.3	5.3	5.2
21 (NE)	90 วัน	0 ชั่วโมง	5.4	5.5	5.4	5.4	5.7
22 (NE)		8 ชั่วโมง	5.4	5.4	5.4	5.4	5.7
23 (NE)		16 ชั่วโมง	5.4	5.5	5.4	5.4	5.7
24 (NE)		24 ชั่วโมง	5.5	5.5	5.4	5.5	5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 4.2.1 การจัดทำดัชนีสุขภาพ

คะแนนสถานะของฉนวนหลักจะถูกคำนวณและใช้ข้อมูลผลการทดสอบที่ระบุไว้ในบทที่ 3 โดยมีผลการคำนวณมีดังนี้

การประเมินจำนวนมอโนเมอร์เฉลี่ยต่อหนึ่งสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยใช้ผลลัพธ์การตรวจวัดสารประกอบพورانในน้ำมันตามตารางที่ 3.15 มีปริมาณ 2-FAL เท่ากับ 14 ppm สามารถประมาณระดับ DP ตามสมการ 3-2 ได้ระดับ DP เท่ากับ 961 จากนั้นใช้เกณฑ์ตามตารางที่ 3.2 ดังนั้นระดับ DP ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีคะแนนอยู่ที่ 4 คะแนน

จากนั้นทำการให้คะแนนพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าโดยใช้ผลการทดสอบจากตารางที่ 3.10 ผลการให้คะแนนแต่ละพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 4.3

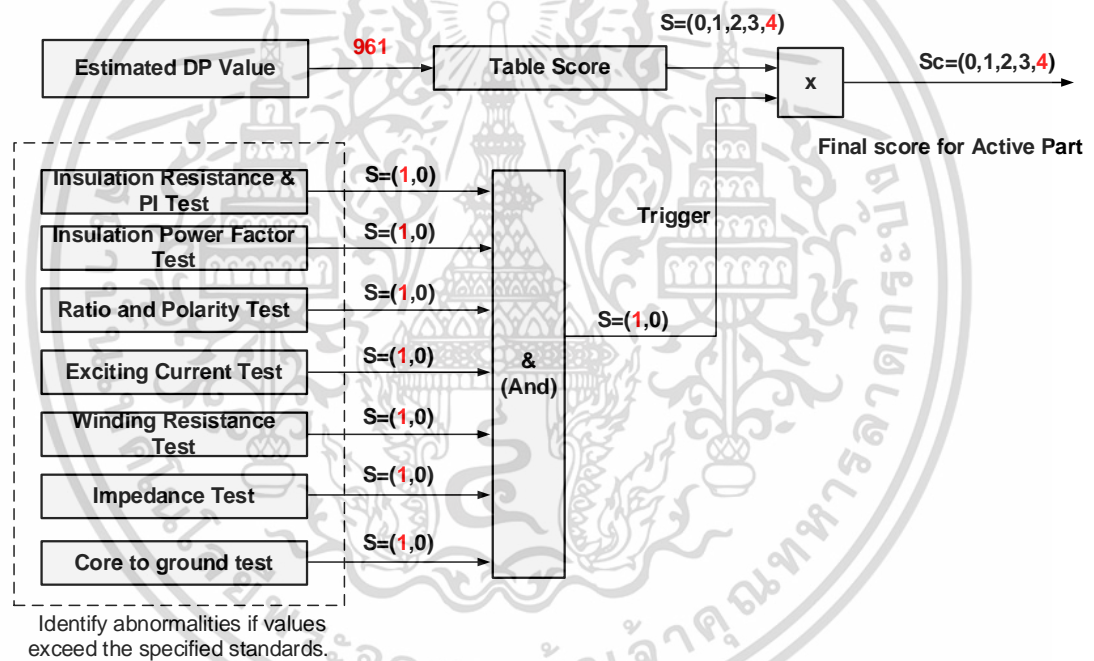
ตารางที่ 4.3 เกณฑ์การประเมิน ผลการทดสอบและคะแนนในหัวข้อการทดสอบทางไฟฟ้า

หัวข้อการทดสอบ	เกณฑ์	ผลการทดสอบ	คะแนน
การตรวจวัดค่าความต้านทาน ความเป็นฉนวน (IR&PI)	IR >1Gohm, 1.25 ≤ PI < 2	IR <sub>p</sub> = 5.13 Gohm, IR <sub>s</sub> = 4.32 Gohm PI <sub>Primary</sub> = 1.93, PI <sub>Secondary</sub> = 1.75	1 (ยอมรับได้, (Acceptable))
การวัดค่าความสูญเสียทาง ฉนวน (PF)	PF < 0.5%	PF <sub>สูงสุด</sub> = 0.2440%	1 (Acceptable)
การวัดอัตราส่วนของหม้อ แปลง	เบี่ยงเบนไปจากเนม เพลต < 0.5%	เบี่ยงเบนไปจาก เนมเพลตสูงสุด 0.13%	1 (Acceptable)
การวัดกระแสกระตุ่น	รูปแบบสูง - ต่ำ - สูง	รูปแบบสูง - ต่ำ - สูง	1 (Acceptable)
การวัดความต้านทานของ ขดลวด	ความต้านทาน ระหว่างเฟสควรอยู่ ภายใน 2%	ความต้านทาน ระหว่างเฟสแตกต่าง สูงสุดไม่เกิน 1%	1 (Acceptable)
อิมพีแดนซ์ (Z)	- ความต้านทานเฟส เดียว: < 3% เมื่อเทียบกับ เฟสอื่น	- ความต้านทานเฟส เดียวสูงสุด 0.233% เมื่อเทียบกับเฟสอื่น	1 (Acceptable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อการทดสอบ	เกณฑ์	ผลการทดสอบ	คะแนน
	- ความต้านทานเฟสสามเฟส: <3% เมื่อเทียบกับเนมเพลต	- ความต้านทานเฟสสามเฟส: 0.044 เมื่อเทียบกับเนมเพลต	
Core to ground	>100 Mohm	ต้านทานของฉนวนต่ำสุด 4670 Mohm	1 (Acceptable)

ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้งหมดที่ทำการทดสอบให้ผลลัพธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ “ยอมรับได้” ทำให้คะแนนของพารามิเตอร์ทุกตัวเป็น 1 เมื่อนำคะแนนของพารามิเตอร์ทุกตัวไปคูณกับคะแนนของระดับ DP จะทำให้ได้คะแนนสถานะฉนวนหลักอยู่ที่ 4 คะแนนซึ่งอยู่ใน “ดี” แผนผังซึ่งระบุคะแนนที่ได้รับแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังซึ่งแสดงผลการคำนวณคะแนนสถานะของฉนวนหลักในหม้อแปลง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ FDS แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นจะทำได้โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบครั้งก่อนหน้า เพื่อพิจารณาว่ามีเส้นโค้งในช่วงความถี่ใดเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิมหรือไม่ แต่เนื่องจากทางผู้จัดทำไม่มีข้อมูลการทดสอบก่อนหน้า จึงทำได้เพียงตีความจากข้อมูลในช่วงความถี่ต่ำ (<0.1Hz) ซึ่งในช่วงความถี่นี้ ปริมาณผลพลอยได้ที่เกิดจากเสื่อมสภาพของฉนวนจะมีอิทธิพลอย่างมากเนื่องจากการโพลาไรเซชันที่ขอบเกรน ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบความสูญเสีย (Tan δ) ในช่วงความถี่ต่ำ (1 mHz) กับสถานะของฉนวนหลักภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 [5] เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.4 สถานะของฉนวนจะตรงกับ “Good” (ดี) ซึ่งไปผลลัพธ์แสดงไปในทิศทางเดียวกับ คะแนนสถานะของฉนวนหลัก

นอกจากนี้ยังพิจารณาพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณ เช่น ร้อยละปริมาณความชื้นในกระดาษ และความอิมตัว ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้ เพียงแต่มาตรฐานกำหนดปริมาณความชื้นที่บ่งบอกถึง สภาพของฉนวนเซลลูโลส ด้วยร้อยละปริมาณความชื้นอิมตัวในน้ำมัน (Percent saturation water in oil) ตามตารางที่ 4.5 [23] แต่ผลการคำนวณจาก FDS ให้ผลการคำนวณเป็นร้อยละของปริมาณความชื้นในกระดาษ อย่างไรก็ตามสามารถแปลงค่านี้ไปเป็นความชื้นอิมตัวในน้ำมันได้ [24] ซึ่งผลลัพธ์การแปลงแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 เช่นกัน จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลการประมาณความชื้น (ตารางที่ 3.12) ที่คำนวณได้ประมาณ 0.7% จะตรงกับเกณฑ์ “Dry” ตามที่กำหนดจากมาตรฐาน IEC 60422-2013

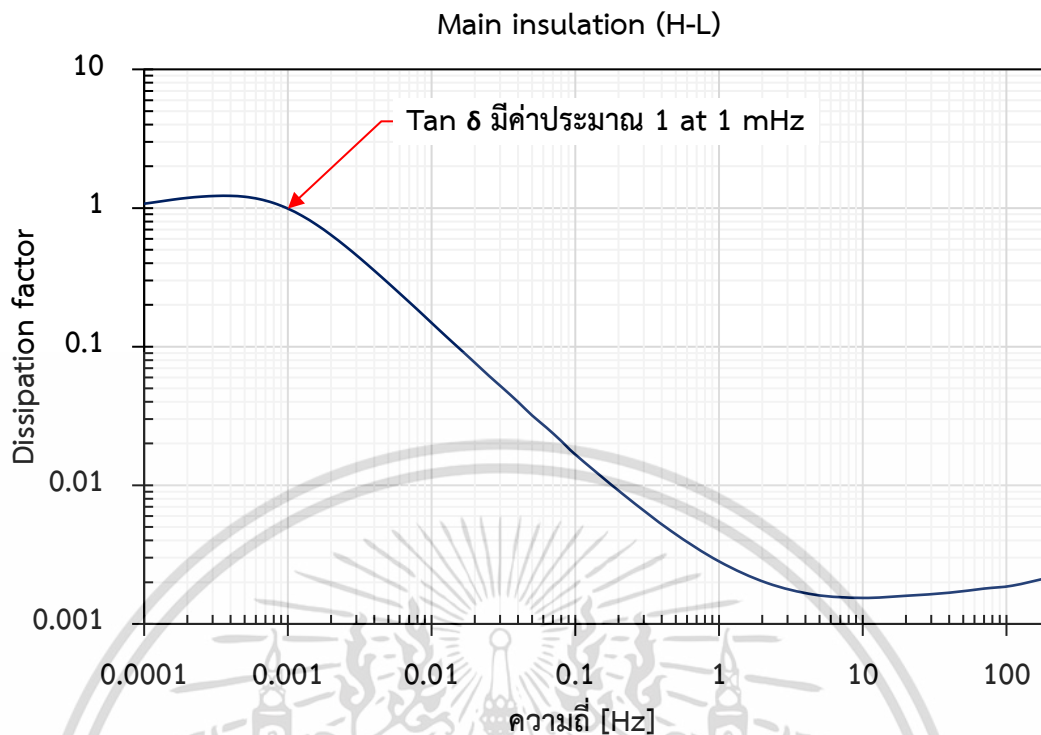
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบความสูญเสีย (Tan  $\delta$ ) กับสภาพของฉนวน [25]

Tan $\delta$	สถานะ
$\text{Tan } \delta \leq 2$	ดี
$2 < \text{Tan } \delta \leq 5$	พอใช้
$5 < \text{Tan } \delta \leq 20$	ต่ำ
$20 < \text{Tan } \delta \leq 100$	ต่ำมาก
$\text{Tan } \delta > 100$	อันตราย

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นอิมตัวในน้ำมันที่แปลงเป็นปริมาณความชื้นในกระดาษต่อสถานะของฉนวน

กำหนดจาก IEC60422-2013		อ้างอิงจากงานวิจัย [24]
ปริมาณความชื้นอิมตัวในน้ำมัน [%]	ความสัมพันธ์กับสถานะของฉนวน(เซลลูโลส)	ความชื้นในกระดาษ [%]
<5	Dry	<2.2
5-20	Moderately Wet	2.2-3.6
20-30	Wet	3.7-4.7
>30	Extremely Wet	>4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบ FDS ของฉนวนหลัก (H-L) ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาค่าองค์ประกอบความสูญเสียที่ 1 mHz

คะแนนระดับความเข้มข้นของแก๊ส (DGAF) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลผลการทดสอบ DGA ตารางที่ 3.13 ซึ่งใช้ข้อมูลจากวันที่ล่าสุดที่ทำทดสอบ คือ “May 18 2023” จะสามารถคำนวณคะแนน DGAF ตามสมการที่ 3-3 ซึ่งได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 4.6 คะแนน DGAF ที่ได้จะถูกนำมาคูณกับตัวคูณลด (TF) ซึ่งได้มาจากการคิดคะแนนอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊สผ่านการคำนวณโดยใช้สมการที่ 3-4 ได้ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 4.7 จากผลลัพธ์การคำนวณแสดงให้เห็นว่าแก๊สความร้อนไม่มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้น มีเพียงแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ซึ่งโดยปกติเป็นสเตรย์แก๊ส (Stray Gas) คือเป็นแก๊สที่สามารถเกิดขึ้นได้แม้ไม่มีความผิดปกติใด และเนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $H_2$  มีค่าค่อนข้างต่ำจึงไม่อาจถูกตีความว่าเป็นผลมาจากการเกิดการเกิดดิซซาร์จบางส่วนได้ จากข้อมูลทั้งหมดส่งผลให้ตัวคูณลดมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งทำให้คะแนน DGAF ยังคงมีค่าเท่ากับ DGAF’

สำหรับการวิเคราะห์อัตราส่วนของแก๊ส ผลลัพธ์ถูกแสดงไว้ในบทที่ 3 ในตารางที่ 3.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการวิเคราะห์แก๊ส  $O_2/N_2$  และ  $CO_2/CO$  อยู่ในเกณฑ์ที่ปกติ แม้ว่าอัตราส่วน  $O_2/N_2$  (อยู่ที่ 0.11) จะไม่อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราส่วนนี้ เห็นได้ว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ จากครั้งผลการทดสอบครั้งก่อน (อยู่ที่ 0.12) จึงไม่สามารถถูกตีความได้ว่า อัตราส่วนที่ไม่ได้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดเกิดจากการบริโภคนอกซิเจน

ของน้ำมันในปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หรือการรั่วไหลของอากาศจากภายนอกเข้ามายังหม้อแปลงไฟฟ้า

นอกจากนี้ เนื่องจากปริมาณแก๊สทั้งหมดอยู่ต่ำกว่าค่าโดยทั่วไปที่มาตรฐานกำหนด การวิเคราะห์หาความผิดปกติเนื่องจากแก๊สจึงไม่สามารถทำได้ ซึ่งหมายถึงไม่มีความผิดปกติของแก๊สทางความใดๆ ดังนั้นคะแนนของอัตราส่วนแก๊สจึงมีค่าเท่ากับ 1 ส่งผลให้ DGAF' ยังคงมีค่าเท่าเดิม ผลลัพธ์นี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเพื่อหาคะแนนสถานะของ DGA ในตารางที่ 3.5 ซึ่งได้ค่าคะแนนสถานะของ DGA เท่ากับ 3 (ยอมรับได้) แผนผังซึ่งระบุคะแนนที่ได้รับและคะแนนสถานะของ DGA แสดงในรูปที่ 4.5

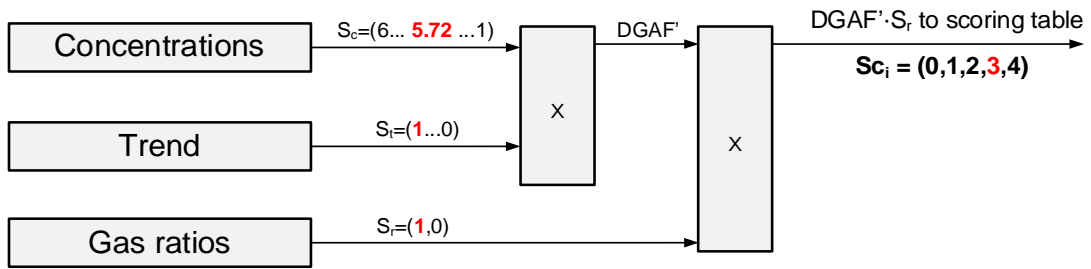
ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์การคำนวณคะแนนระดับความเข้มข้นของแก๊ส

แก๊ส	คะแนนระดับความเข้มข้น ( $S_i$ )	น้ำหนัก ( $W_i$ )	$S_i \times W_i$	ผลรวม ( $S_i \times W_i$ )	DGAF
H <sub>2</sub>	6	2	12	103	5.72
CO	3	1	3		
CO <sub>2</sub>	4	1	4		
CH <sub>4</sub>	6	3	18		
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6	3	18		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6	3	18		
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	6	5	30		
รวม		18	103		

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณคะแนนของอัตราการเพิ่มขึ้นของแก๊ส

แก๊ส	อัตราการเพิ่มขึ้นใน 1 ปี [%]	คะแนน ( $S_i$ )	$S_i \times W_i$	TF	DGAF'
H <sub>2</sub>	1.92	4	8	1	1
CO	-	4	4		
CO <sub>2</sub>	-	4	4		
CH <sub>4</sub>	-	4	12		
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	4	12		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-	4	12		
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	-	4	20		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แผนผังซึ่งแสดงผลลัพธ์การคำนวณคะแนนสถานะของ DGA

คะแนนของคุณภาพน้ำมัน (OQF) ซึ่งใช้ข้อมูลผลการทดสอบจากตารางที่ 3.15 ซึ่งพิจารณาแรงดันในช่วง 69kV<U<230kV เนื่องจากระดับแรงดันสูงสูงที่ฉนวนต้องเผชิญคือ 115 kV ผลการพิจารณาและการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 แม้การทดสอบหาปริมาณสารพาซิเวเตอร์ (Passivator content) ซึ่งเป็นสารที่ต้องเติมหากมีการตรวจพบปริมาณสารไดเบนซีนไดซัลไฟด์ (Dibenzyl disulfide ,DBDs) โดย DBDs เป็นสารที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากกำมะถัน (Sulfur) และ Passivator เป็นสารที่จับตัวกับผิวของตัวนำเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากกำมะถันจะให้ผลคะแนนที่ต่ำที่สุด (1 คะแนน) แต่เนื่องจากผลการทดสอบการกัดกร่อน (Corrosivity) ยังไม่พบการกัดกร่อน จึงสรุปได้ว่าปริมาณสาร Passivator ที่ต่ำนั้นยังไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

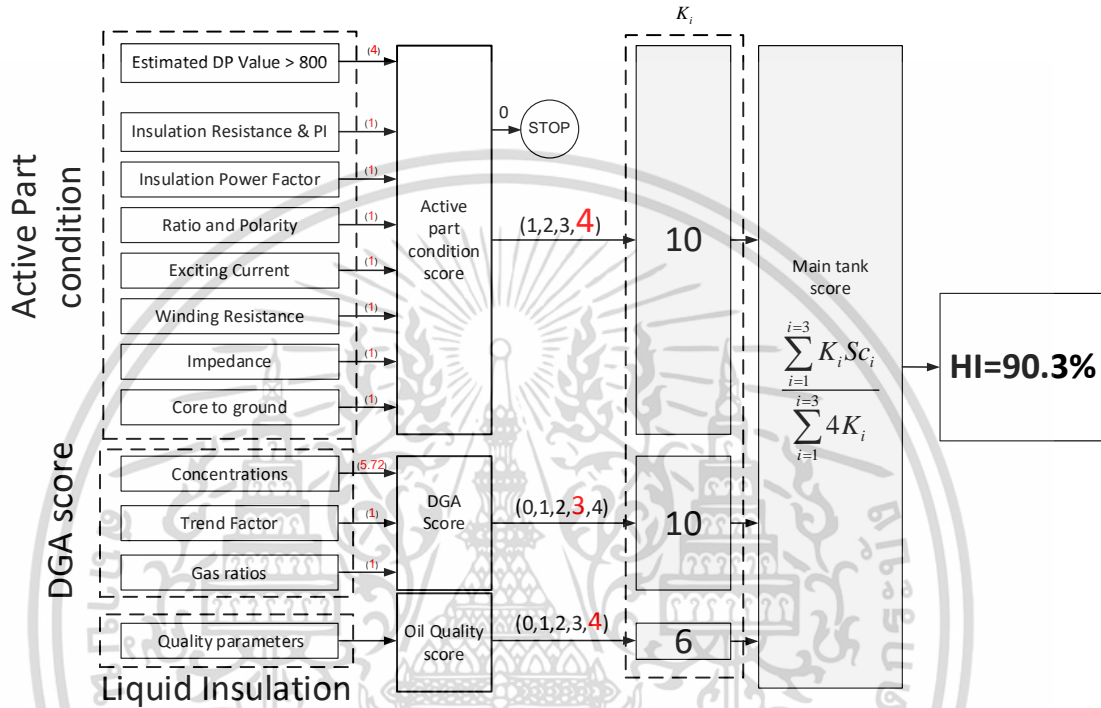
เมื่อกำหนดคะแนนทั้งหมด คะแนนคุณภาพน้ำมันจะอยู่ที่ 3.8 ซึ่งตรงกับคะแนนสถานะของน้ำมันที่ 4 (ดี) (ตารางที่ 3.6)

ตารางที่ 4.8 ผลการให้คะแนนการทดสอบ ผลคะแนน OQF และคะแนนสถานะของคุณภาพน้ำมัน

หัวข้อการทดสอบ	คะแนน (S <sub>i</sub> )	น้ำหนัก (W <sub>i</sub> )	S <sub>i</sub> × W <sub>i</sub>
Dielectric Strength [kV] (2mm gap)	4	3	12
Interfacial tension [dyne/cm]	4	2	8
Acid number [mg KOH/g oil]	4	1	4
Water content [ppm]	4	4	16
Dissipation factor [%] (at 25°C)	4	3	12
Passivator content [mg/kg]	1	1	1
Corrosivity	4 (non-corrosive)	4	16
<b>ผลรวม</b>		18	69
<b>OQF</b>			3.8
<b>คะแนนสถานะของคุณภาพน้ำมัน</b>			<b>4 (ดี)</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้ผลการคำนวณสถานะทั้งหมดแล้ว คะแนนสถานะจะถูกนำไปคูณด้วยน้ำหนัก ซึ่งอ้างอิงมาจากงานวิจัย [12] คือ น้ำหนักคะแนนสถานะของฉนวนหลักมีค่า 10, น้ำหนักคะแนนสถานะของ DGA มีค่า 10, และน้ำหนักคะแนนสถานะฉนวนเหลวมีค่า 6 จากนั้นคำนวณหาดัชนีสุขภาพตามสมการที่ 3-1 จะได้คะแนนดัชนีสุขภาพอยู่ที่ 90.3% นอกจากนี้จากงานวิจัย [12] ผลคะแนนดัชนีสุขภาพสามารถระบุอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงแสดงในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.6 แผนผังซึ่งแสดงผลลัพธ์การคำนวณดัชนีสุขภาพ

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของดัชนีสุขภาพและอายุที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

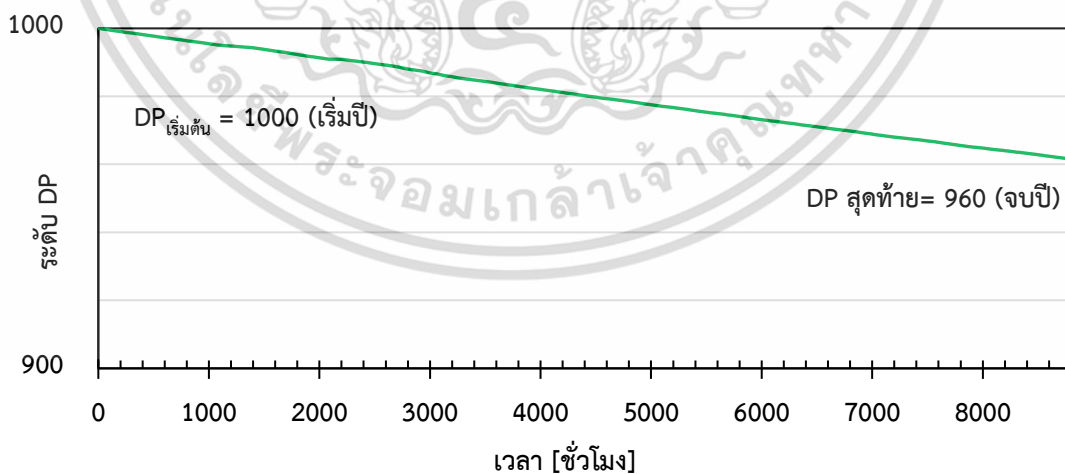
ดัชนีสุขภาพ [%]	สถานะ	คำอธิบาย	ประมาณอายุที่เหลืออยู่
85-100	ดีมาก	ส่วนประกอบบางอย่างมีการเสื่อมสภาพเพียงเล็กน้อย	มากกว่า 15 ปี
70-85	ดี	ส่วนประกอบบางอย่างเสื่อมสภาพอย่างมีนัยสำคัญ	มากกว่า 10 ปี
50-70	พอใช้	ส่วนประกอบหลายอย่างมีการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง	น้อยกว่า 10 ปี
30-50	ต่ำ	การเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง	น้อยกว่า 3 ปี
0-30	ต่ำมาก	การเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงมาก	สิ้นอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

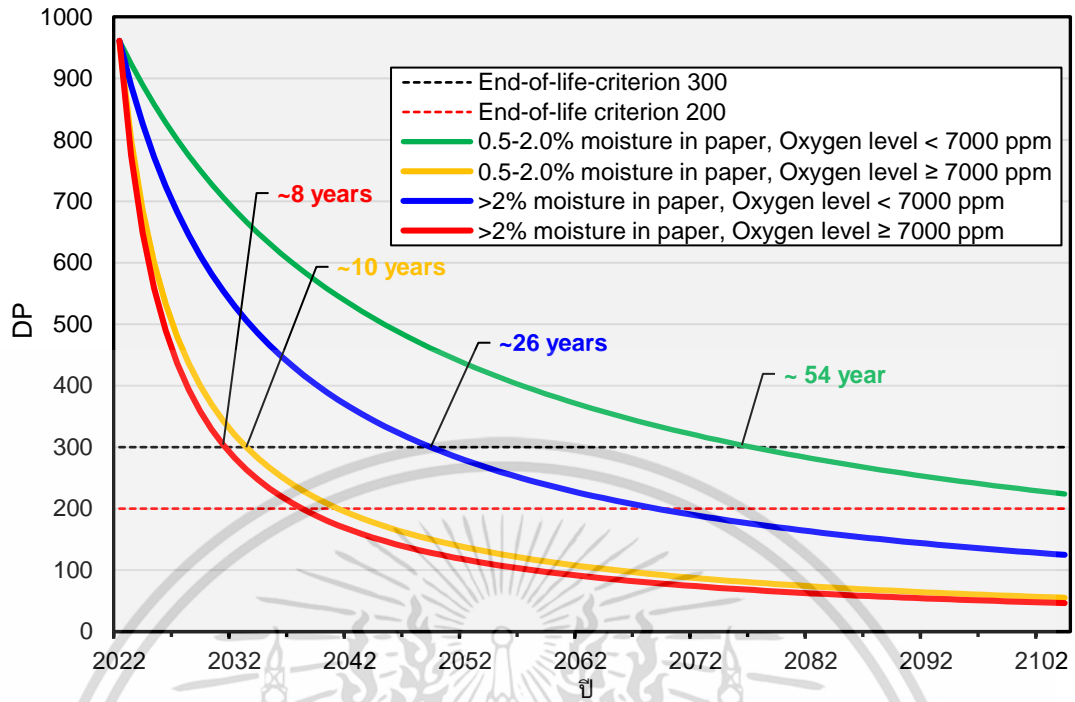
#### 4.2.2 การประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านการคำนวณโดยใช้แบบจำลองอธิบายการย่อยสลายของเซลล์โลส ซึ่งมีข้อมูลอินพุตเป็น อุณหภูมิของลวดสายขั้วโม่ง ปริมาณแก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำมันซึ่งได้มาจากการทำ DGA และปริมาณความชื้นในกระดาษซึ่งได้มาจากการคำนวณผ่านการทดสอบ FDS (จากการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบ FDS สามารถคำนวณหาปริมาณความชื้นในกระดาษได้ใกล้เคียงกับการวัดโดยตรง) ข้อมูลอุณหภูมิขดลวดสายขั้วโม่งตลอดปีแสดงในรูปที่ 3.14 อุณหภูมิรายชั่วโมงของขดลวดแรงต่ำของปีที่ถูกละเลือก จะถูกใช้ในการประเมินเนื่องจากโหลดในปีนั้นมีการใช้งานเฉลี่ยมากที่สุด ในส่วนของแก๊สปริมาณ  $O_2$  จะนำมาจากการทดสอบ DGA ล่าสุด ผลการคำนวณระดับ DP จากเส้นใยเซลล์โลสที่ถูกตัดตลอดทั้งปีแสดงในรูปที่ 4.7 โดยใช้ระดับ DP เริ่มต้นที่ 1000 จากนั้นทำการคำนวณตัวแทนของอัตราการเสื่อมสภาพของโปรไฟล์โหลดปีที่นำมาใช้งาน และนำไปคำนวณระดับ DP ในปีถัดๆไป ซึ่งให้ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 4.8 โดยกราฟเส้นสีเขียวคือระดับ DP ที่ประมาณโดยสภาพจากการทดสอบครั้งล่าสุด เส้นสีเหลืองคือกรณีที่หม้อแปลงมีปริมาณความชื้นปกติแต่มีปริมาณ  $O_2$  สูง (ซึ่งอาจเกิดจากหม้อแปลงมีรอยรั่ว) เส้นสีน้ำเงินคือกรณีที่หม้อแปลงมีความชื้นสูงแต่มีปริมาณ  $O_2$  ปกติ และสุดท้ายคือเส้นสีแดงคือมีปริมาณความชื้นและปริมาณ  $O_2$  สูง

ตารางที่ 4.10 แสดงอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาว่าหม้อแปลงไม่สามารถใช้งานต่อได้ที่ระดับ DP ต่ำกว่า 300 อย่างไรก็ตามความเครียดชั่วคราวใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นบนขดลวด เช่น การสวิตชิ่งและภาวะชั่วคราวจากฟ้าผ่า ฯลฯ อาจส่งผลให้เกิดความล้มเหลวของฉนวนก่อนอายุการใช้งานโดยประมาณ (ความล้มเหลวก่อนเวลาอันควร)



รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์ของระดับ DP ตลอดทั้งปีด้วยการคำนวณโดยใช้ข้อมูลปริมาณความชื้นและปริมาณแก๊ส  $O_2$  จากผลการทดสอบครั้งล่าสุด



รูปที่ 4.8 เส้นโค้งประมาณระดับ DP ของฉนวนเซลลูโลส

ตารางที่ 4.10 สรุปีปีที่หม้อแปลงคาดว่าจะหมดอายุการใช้งาน (DP=300) จากสภาพเงื่อนไขต่างๆ

		ความชื้นในกระดาษ [%]	
		0.5-2.0	>2.0
ระดับออกซิเจน [ppm]	<7000	2077*(~54 years)	2049
	≥7000	2033	2031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบ

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยวัดผลตอบสนองไดอิเล็กทริกของเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตด้วยน้ำมันแร่และเอสเทอร์ธรรมชาติในเวลาที่แตกต่างกันจากนั้นผ่านการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนในเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการตรวจหาและเปรียบเทียบปริมาณความชื้นในกระดาษ รวมไปถึงการจัดทำดัชนีสุขภาพ และการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 122/175 MVA 115 KV – 15.75 kV สามารถสรุปออกมาได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

##### 5.1.1 การทดลองในห้องปฏิบัติการ การศึกษาผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในการประเมินปริมาณความชื้นในเพอร์สโอร์ตที่อิมเพรกเนตจากฉนวนเหลว 2 ชนิด

สำหรับเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตและทำให้เสื่อมสภาพด้วยน้ำมันแร่ การประเมินปริมาณความชื้นในเพอร์สโอร์ตด้วยวิธีการทดสอบผลตอบสนองไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 1mHz-1kHz และการวัดความชื้นโดยตรงด้วยเทคนิค Coulometric Karl Fisher ให้ผลลัพธ์ที่มีความใกล้เคียงกันในช่วงความชื้นที่วัดได้ตั้งแต่ 0.5-7.3% สำหรับทุกตัวอย่างที่นำไปทดสอบ โดยผลจากการทดสอบ FDS ให้ปริมาณความชื้นที่แตกต่างไม่เกิน 0.2% wt. เมื่อเทียบกับการทดสอบโดยตรง (Coulometric Karl Fisher) แสดงให้เห็นว่าการประเมินปริมาณความชื้นด้วยการทดสอบ FDS มีประสิทธิภาพเพียงพอ ในการอ้างอิงถึงปริมาณความชื้นภายในกระดาษ

สำหรับเพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตและทำให้เสื่อมสภาพด้วยน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่มีต่อผลตอบสนองไดอิเล็กทริก ผลลัพธ์ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าแม้เพอร์สโอร์ตที่ถูกอิมเพรกเนตในเวลาที่แตกต่างกันจะผ่านการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง (150°C) แต่ผลตอบสนองของตัวอย่างที่ผ่านการอิมในเวลาทีน้อยกว่าจะลู่เข้าหาตัวอย่างที่อิมเพรกเนตเป็นเวลานานกว่าในทุกช่วงความถี่ หรืออาจพูดได้ว่ากระบวนการอิมเพรกเนตยังคงดำเนินต่อไป และแสดงผลลัพธ์ที่เด่นชัดมากกว่าการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส สำหรับการทดสอบหาปริมาณความชื้น FDS ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการวัดปริมาณความชื้นโดยตรง นอกจากนี้แม้จะอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงเป็นเวลา 90 วันแต่ผลลัพธ์ของการทดสอบความชื้นยังคงมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ 30 วัน เนื่องจากความชื้นเป็นผลพลอยได้จากการเสื่อมสภาพของกระดาษ นั้นแสดงให้เห็นว่ากระดาษมีการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้นไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเสถียรต่ออุณหภูมิของน้ำมันเอสเทอร์ธรรมชาติที่ช่วยให้กระดาษเสื่อมสภาพช้าลง

### 5.1.2 ดัชนีสุขภาพและการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการทดสอบทางไฟฟ้า การทดสอบแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง และคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ไม่แสดงการเสื่อมสภาพของฉนวนที่มีนัยสำคัญ ระดับ DP ยังคงมากกว่า 800 และปริมาณสารประกอบฟูราน (2-FAL) มีค่าต่ำกว่า 20 ppm บ่งบอกถึงของการเสื่อมสภาพของฉนวนเซลล์โลสที่เล็กน้อย โดยรวมแล้วสภาพทั้งฉนวนและส่วนประกอบยังอยู่ในสภาพดี อายุการใช้งานที่เหลืออยู่โดยประมาณของหม้อแปลงนี้คือมากกว่า 15 ปี

การประเมินอายุของหม้อแปลงที่เหลืออยู่ในกรณีที่ สภาวะโหลดที่ไม่เกินปีตัวอย่างที่ถูกเลือกมา ปริมาณความชื้นในกระดาษจะต้องน้อยกว่า 2% โดยไม่มีสัมผัสออกซิเจนและการรั่วไหลของน้ำมันแร่ (ปะเก็นที่เสื่อมสภาพ) จะสามารถใช้งานต่อไปได้อีก 54 ปี หรืออย่างน้อย 8 ปีในสภาพที่แย่ที่สุด อย่างไรก็ตามความเครียดทางไฟฟ้าหรือความร้อนชั่วคราวใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นบนขดลวด เช่น การสวิตชิงและภาวะชั่วคราวจากฟ้าผ่า เป็นต้น อาจส่งผลให้เกิดความล้มเหลวของฉนวนก่อนอายุการใช้งานที่ประมาณไว้ (ความล้มเหลวก่อนเวลาอันควร)

ดัชนีสุขภาพที่ถูกจัดทำนี้เป็นเพียงการประเมินฉนวนภายในตัวถังหลักของหม้อแปลง โดยไม่รวมส่วนประกอบอื่นที่ส่งผลต่ออายุของหม้อแปลงไฟฟ้า และเกณฑ์ในการตัดสินผลการทดสอบส่วนใหญ่ให้ความละเอียดเพียง 0 และ 1 นั้น มีข้อดีคือหากสภาพของหม้อแปลงเปลี่ยนไปดัชนีสุขภาพจะตกลงอย่างรวดเร็วทันที ในทางกลับกันดัชนีนี้ไม่สามารถสะท้อนถึงผลของการเสื่อมสภาพอย่างต่อเนื่องได้

#### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดสอบคุณสมบัติอื่นๆของเพอร์สโอบด์และคุณสมบัติของน้ำมันว่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เพื่อสามารถบอกถึงพฤติกรรมของการเสื่อมสภาพของฉนวนเหลวเอสเทอร์ธรรมชาติได้อย่างถูกต้อง
2. ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ควรมีเกณฑ์ตัดสินใจที่ละเอียดกว่านี้ แต่ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ตอบสนองได้ดีหากหม้อแปลงมีสภาพที่เปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ
3. การประเมินอายุด้วยการคำนวณหาเส้นใยของเซลล์โลสที่ถูกตัด ควรทำการคำนวณตั้งแต่ชั่วโมงแรกที่มีหม้อแปลงมีการจ่ายไฟ และปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์อินพุตอยู่เสมอเมื่อมีผลการทดสอบความชื้นหรือ DGA เพื่อให้ผลการประเมินสะท้อนถึงการเสื่อมสภาพของฉนวนได้ใกล้เคียงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Martin J. Heathcote, D. P. Franklin “The J & P transformer book : a practical technology of the power transformer,” 2007, Elsevier Ltd.
- [2] 3D High Voltage Power Distribution Transformer Inside 46 - TurboSquid 1743457
- [3] Andreas, K. 2018. High Voltage Engineering Fundamentals Technology Applications. Germany : Springer Vieweg.
- [4] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช. 2557. วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า (เล่มที่ 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน เซอร์วิส ซัพพลาย.
- [5] กรยา จงวิไลเกษม. 2563. “แก๊สละลายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เอสเทอร์ธรรมชาติเป็นฉนวน,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] CIGRE. “Experiences in Service with New Insulating Liquids” CIGRE WORKING Group A2.35. 2010.
- [7] Tapan Kumar Saha and Prithwiraj Purkait, Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques, 1st Ed., Singapore, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2017.
- [8] Bakelite Electrical Insulation Board, <https://www.alibaba.com/showroom/bakelite-electrical-insulation-board.html>
- [9] S. Chakravorti, D. Dey, and B. Chatterjee, “Frequency Domain Spectroscopy,” Power Systems. Springer London, pp. 193–225, 2013.
- [10] "IEEE Guide for Dielectric Frequency Response Test," in IEEE Std C57.161-2018, vol., no., pp.1-76, 20 Nov. 2018
- [11] “Dielectric Response. Diagnoses for Transformer Windings” CIGRÉ. Task Force D1.1.14, Technical Brochure 414
- [12] A. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service and W. Fan, "An approach to power transformer asset management using health index," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 25, no. 2, pp. 20-34, March-April 2009
- [13] CIGRE Working Group 05, “An international survey of failures in large power transformers in service,” Electra, no. 88, pp. 21–48, May 1983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] L. E. Lundgaard. Håndbok i vedlikehold av krafttransformatorer- 2a vikling. 2011. Part of the Power Transformer Handbook by SINTEF Energy Research.
- [15] ABB. Service Handbook for Transformers. 2007
- [16] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter. Aging of oil impregnated paper in power transformers. 2004
- [17] L. E. Lundgaard et al. Tr a7099 transformer windings- ageing, diagnostics, and asset management, 2013.
- [18] IEC 60076-7. Loading guide for oil-immersed transformers. 2005
- [19] Cigre 323, Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, 2007.
- [20] "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors," in IEEE Std C57.152-2013
- [21] IEC Publication 60599, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service- Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis, 2015
- [22] IEEE Std C57.104, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, 2019.
- [23] IEC 60422, Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance 2013.
- [24] M. A. Ansari, D. Martin and T. K. Saha, "Advanced Online Moisture Measurements in Transformer Insulation Using Optical Sensors," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 27, no. 6, pp. 1803-1810, December 2020
- [25] Gorgan, B., Notinger, P. V, Badicu, L. V, & Tanasescu, G. (2010). Calculation of Power Transformers Health Indexes. Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิชาการ

- **K. Chumpiboon**, W. Vittayakorn, Y. Kittikhuntharadol, S. Maneerot, N. Pattanadech and P. Chanchaoensook, "Frequency Domain Spectroscopy of Pressboard Impregnated with Natural Ester under Thermal Stress," 2022 9th.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Frequency Domain Spectroscopy of Pressboard Impregnated with Natural Ester under Thermal Stress

K. Chumpiboon<sup>1\*</sup>, W. Vittayakorn<sup>2</sup>, Y. Kittikhuntharadol<sup>1</sup>, S. Maneerot<sup>3</sup>, N. Pattanadech<sup>1</sup>, P. Chancharoensook<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, School of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup>King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang College of Nanotechnology, Bangkok, Thailand

<sup>3</sup>TESLA Power CO., LTD., Om Noi, Samut Sakhon 74130, Thailand

\*E-mail: kchumpiboon@gmail.com

**Abstract** – One of the most popular insulating liquids is mineral oil, which is used in many high-voltage apparatuses, especially in transformers. For a few decades, the concept of the use of alternative insulating liquids has been presented. Natural ester is a vegetable-based insulating liquid. Pressboard is a type of electrical insulation paper made of cellulose. Frequency Domain Spectroscopy (FDS) has been used to assess the insulation characteristics such as oil-impregnated paper. In this paper, the FDS of pressboard impregnated with natural ester under thermal stress and pressboard impregnated with natural ester were studied. In the experiment, the pressboard test specimens were heated at 100 degrees Celsius in a vacuum oven for 48 hours to reduce the moisture. Then, the test specimens were impregnated with natural ester for 0, 8, 16, and 24 hours. After that, they were simulated with thermal stress by heating at 150 degrees Celsius in a vacuum oven for 0, 30, and 90 days. To analyze their dielectric integrity, FDS was performed by DIRANA. The test cell for solid insulation testing, according to JIS C2111 was prepared and used for the FDS experiment. The result shows that the characteristics of the natural ester-impregnated pressboard that had been subjected to thermal stress were slightly different when compared with the same impregnation time of the pressboard.

**Keywords:** Natural ester, Impregnated pressboard, Thermal stress, Cellulose, Frequency Domain Spectroscopy (FDS)

## I. INTRODUCTION

Since several decades ago, mineral insulating oil has been extensively used in high-voltage power equipment because of its exceptional electrical and cooling performance and inexpensive cost. It is commonly utilized as the principal insulation in high-voltage equipment insulation systems. However, mineral oil has weaknesses such as low fire point, moisture sensitivity, and the inability to decay organically [1].

Environmental issues are currently taken into account. Consequently, it has been suggested that more ecologically friendly electrical insulating studies be conducted. Liquid dielectric coolants with a basis of synthetic ester oil are environmentally friendly insulating because of how they are produced. In comparison to mineral oil, the natural ester is more stable at high temperatures. Therefore, there is less deterioration than with mineral oil. Transformers produce moisture at high temperatures as the cellulose insulation ages. Dielectric strength decreases when the insulation system's moisture content rises. Ester fluids can absorb moisture from the air, cellulose, and other materials to a greater extent than

mineral oils. When cellulose insulation is impregnated with ester fluid as opposed to mineral, the aging process of the cellulose can be greatly slowed down. The electrical characteristics, biodegradability, oxidation stability, and fire safety of natural ester have been improved. Natural esters are generally more expensive, but they have very low freezing and melting points, making them suitable for applications requiring thermal stability at temperatures that experience large variations [1-2].

This paper studies the trend of pressboard impregnated with natural ester under thermal stress at 150 °C. The relative permittivity and the dielectric dissipation factor are measured using Frequency Domain Spectroscopy (FDS). The purpose of FDS is to access the insulating properties at various frequencies. In this experiment, the frequency range of 1 mHz–1 kHz is used, which is the frequency used in practice [3].

## II. RELATED THEORY

### A. Basic of Frequency Domain spectroscopy

Frequency Domain Spectroscopy (FDS) is a non-destructive technique to assess the condition of the insulation. To determine the impedance of the insulation, AC voltage is applied to the insulation and then precisely measured the current through the insulation. A phase difference between the voltage  $U(\omega)$  and the current  $I(\omega)$  is analyzed within the measured frequency range. The impedance of the insulation can be explained as follows

$$\bar{Z}(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \bar{U}(\omega) / \bar{I}(\omega) \quad (1)$$

which can be rewritten into the form of complex capacitance

$$\bar{I}(\omega) = j\omega\bar{C}(\omega)\bar{U}(\omega) \quad (2)$$

The correlation between complex capacitance and complex permittivity can be determined as follows

$$\bar{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \frac{\bar{C}(\omega)}{C_0} \quad (3)$$

where  $C_0$  is the geometrical capacitance of the insulation

In the frequency domain, the dielectric dissipation factor ( $\tan \delta$ ) can be written as

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (4)$$

This research is supported by TIS Engineering and Service CO.,LTD.

Equation (3) demonstrates that the real part of complex permittivity represents the polarization of the insulation while the losses component is represented by the imaginary part [3]. Due to the important role that water molecules provide in polarization as highly polar dipoles. FDS is an effective method for assessing transformer insulation since it is sensitive to moisture content [4].

**B. Dissipation factor ( $\tan \delta$ )**

The power lost when the cellulose insulation is exposed to an AC electric field is assessed by the dissipation factor, which is obtained when the moisture content of the insulation rises. Within the insulation, power is transferred as heat. A low dissipation factor number indicates that little of the applied power will be lost due to the insulation. Due to its vulnerability to ionic pollutants, this component represents the degradation and contamination of insulating [3].

**III. EXPERIMENTAL PROCEDURE**

**A. Test Specimens Preparation**

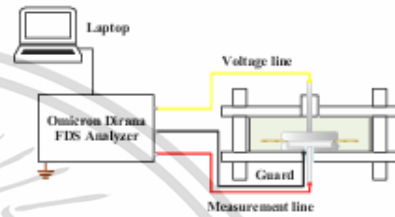
This paper uses a pressboard with dimensions (width x length x depth) of 120 x 120 x 1.6 millimeters, and the oil used is a natural ester. The new natural ester was pre-dehydrated and degassed for 24 hours at 100°C in the vacuum oven, and the unused pressboard samples were pre-dehydrated for 48 hours at 100°C. To create a separation between pressboard samples and enable the moisture content to be readily eliminated, a tray with a slot was built. After pre-dehydration and naturally cooling down, the natural ester was mixed with pressboard samples in the tray with slots. The pressboard samples were submerged entirely in the natural ester. Then, the tray with pressboard samples and natural ester was placed in the vacuum oven at 60°C, and the impregnation process proceeded for 0, 8, 16, and 24 hours. Finally, the impregnated pressboard samples were stressed at 150°C in a closed system oven for 0, 30, and 90 days. All the test specimens are concluded in Fig. 1.



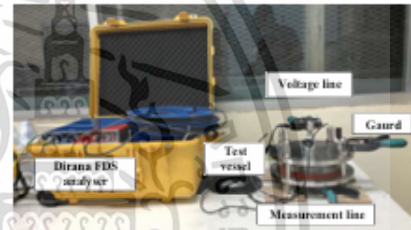
Fig. 1. Test specimens in experiment.

**B. FDS Measurement**

The schematic diagram of the FDS measuring system is shown in Fig. 2(a). The main components include with test cell, Omicron Dirana FDS Analyzer, and a laptop. The test cell was thoroughly cleaned, and 3-terminal stainless steel plate-to-plate electrodes were attached. Below, the guard ring and measuring electrode are connected. And the voltage line was applied to the top electrode. Natural esters that were dehydrated and degassed were added until the top electrode was flooded. The Omicron Dirana FDS analyzer can provide AC voltage with an amplitude of 200 V and perform FDS analysis in the frequency range of 1 mHz to 5 kHz. The experiments were performed at room temperature.



(a) The schematic diagram of the FDS measuring system.



(b) Test circuit set-up.

Fig. 2. The schematic diagram of the FDS measuring system and test circuit set-up.

The test cell was prepared for the FDS measuring according to JIS C2111. FDS test circuit set-up was illustrated in Fig. 2(b).

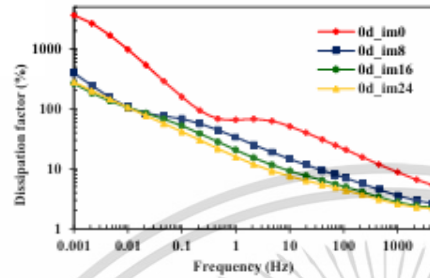
**IV. RESULT AND DISCUSSION**

The FDS measurement test result of non-thermal stress pressboards impregnated with natural ester at various times is shown in Fig. 4. The impregnation time significantly affects the dissipation factors. For non-thermal stress pressboards impregnated for less than 8 hours, a hump occurs in the dissipation factor-frequency curve. It can also be seen that the impregnation time impacts the frequency point value where the hump first occurs instead of the curve's hump peak value. At low very low frequency range (< 10mHz), the response dramatically rises for the non-impregnated sample.

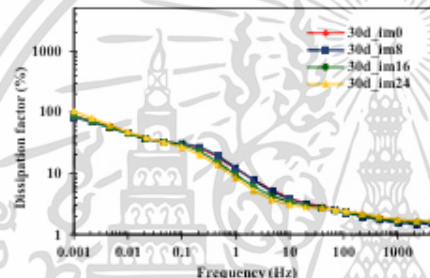
At high temperatures, thermal stress leads to the thermal deterioration of insulation. Due to its stability at high temperatures, the impregnation process may continue while samples are under thermal stress, producing overlapping curves. However, in Fig. 4(b), for the samples under thermal stress for 30 days, there is little difference in the central part of

the response, which is mainly influenced by the characteristics of the oil conductivity [5].

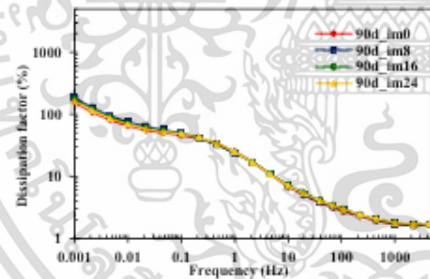
Fig. 4(c), shows the pressboards impregnated with natural ester oil under thermal stress for 90 days, the response curves of all samples almost completely overlap across the measurement frequency range.



(a) Non-thermal stress.



(b) Under thermal stress for 30 days.



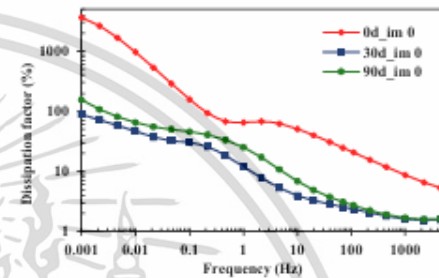
(c) Under thermal stress for 30 days.

Fig. 4. Dissipation factor of pressboards impregnated under thermal stress with varied impregnation times.

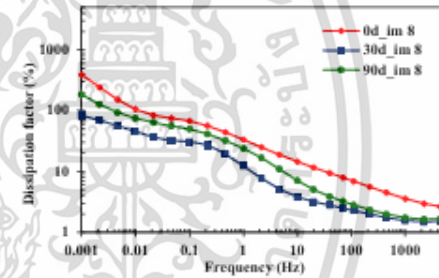
Incorporating the same impregnation time with lengthening thermal stress periods. In Fig. 5(a) show the response of non-impregnated pressboard under thermal stress for 30 days, decreasing throughout the measured frequency range when considered from the non-thermal stress response curve. The hump's frequency point and the curve's hump peak value are changed. The response at the very low frequency indicates improved pressboard condition. Moreover, lower conductivity

of the natural ester oil is observed in the mid-range of the response. Then, after 90 days of thermal stress, aging of the cellulose and an increase of moisture content in the pressboard from the increase of response curve is observed when considered from the response curve of 30 days under thermal stress.

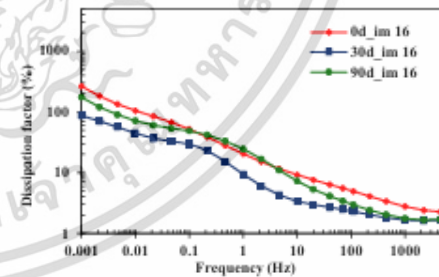
For an impregnation time of 8 hours or more, show as Fig. 5, the responses of the samples under thermal stress for 30 days tend to improve the better condition of cellulose (lower moisture content) than non-thermal stress samples, even under thermal stress at 150°C, and would begin to show deterioration after 90 days. However, 90 days under thermal stress, the response curve tends to be a better insulation condition than in non-thermal stress samples.



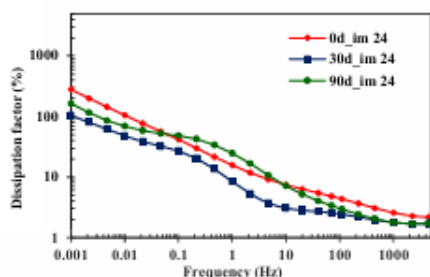
(a) Non-impregnated pressboards.



(b) 8 hours-impregnated pressboards.



(c) 16 hours-impregnated pressboards.



(d) 24 hours-impregnated pressboards.

Fig. 5. Dissipation factor of pressboards impregnated with natural ester under different times of thermal stress.

In Fig. 5(c) and 5(b), the dissipation factor of the impregnated pressboard was shown for 16 hours and 24 hours of impregnation time, respectively. The 90-day samples response curve intersects with the non-thermal stress samples response curve, in the frequency range of 0.1 Hz - 10 Hz.

#### V. CONCLUSION

In this paper, the FDS of the pressboard impregnated with natural ester under thermal stress is considered by using the dissipation factor response curve in the log-log scale graph. The response of pressboards with varied impregnation times shows different responses. After undergoing the thermal stress process for 30 days, the response of 0, 8, and 16 hrs. impregnation time samples showed to be similar to pressboard condition, which has 24 hrs. impregnation time. Then All samples with similar responses begin the deterioration simultaneously, which was observed in the overlapping and upward responses of samples that went through the thermal stress process for 90 days.

Pressboard's electrical properties can be enhanced via impregnation with natural ester. However, the test results indicated applying non-impregnated pressboards inside a transformer, the electrical properties can also be enhanced with time, but failure is more likely in the early stages. However, using natural ester inside the transformer reduces the chances of failure at high temperatures.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors also gratefully acknowledge all staff of Dielectric Analytika Laboratory (DIKALab) and high voltage laboratory King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for recommendations.

#### REFERENCE

- [1] N. Zimmerman and R. Bass, "Consideration of Ester-Based Oils as Replacements for Transformer Mineral Oil", Portland, 2014.
- [2] I. L. Hösier, A. Guishan, E. W. Westenbrink, C. Rogers, A. S. Vaughan, and S. G. Swingle, "Aging of biodegradable oils and assessment of their suitability for high voltage applications," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 3, pp. 728-738, June 2011.
- [3] S. Chakravorti, D. Dey, and B. Chatterjee, "Frequency Domain Spectroscopy," *Power Systems*. Springer London, pp. 193-225, 2013.
- [4] Z. Mu, Y. Yang, and Z. D. Wang, "Effect of Moisture on Frequency Domain Spectroscopy (FDS) for Oil-Impregnated-Paper Insulation," 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD), 2018, pp. 1-4.
- [5] S.M. Guhmaki, J. Blennow, B. Holmgren, M. Koch, A. Kuechler, R. Kützer, et al. "Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings", *CIGRE Technical Brochure 414 WG D1.01 (TF 14)*, 2010.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายโกมินทร์ ชุมพิบูลย์
วัน เดือน ปีเกิด	6 มกราคม 2542
ที่อยู่	106/6 ตำบลคูหาสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง 93000
ประวัติการศึกษา	2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง 2.) การทดสอบและวิเคราะห์การเสื่อมสภาพระบบฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2565	วารสาร Advances in Materials Science and Engineering - Physical and chemical properties's comparison of natural ester and palm oil used in a distribution transformer งานประชุมวิชาการ CMD 2022 ประเทศญี่ปุ่น - Frequency Domain Spectroscopy of Pressboard Impregnated with Natural Ester under Thermal Stress
พ.ศ. 2566	งานประชุมวิชาการ ISEIM 2023 ประเทศญี่ปุ่น - Partial Discharge Testing on MV Motor – Case Study - The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้