

วิธีการ CFAE สำหรับการประเมินสภาพฉนวนกระดาษชุบน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง CFAE Method for Condition Assessment of Oil-Impregnated Insulating Paper of Power Transformers

ณัฐพงศ์ ศรีแจ่ม* และ นัตยา คล้ายเรือง
Nattapong Sornjam* and Nattaya Klairuang

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Sriracha Campus

*E-mail: nattapong.sornjam@ku.th

Received: Apr 16, 2021

Revised: Oct 14, 2021

Accepted: Oct 28, 2021

บทคัดย่อ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์หลักที่มีมูลค่าสูงและเป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบเครือข่ายไฟฟ้าแรงสูง ทำให้การประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของหม้อแปลงมีความสำคัญมากสำหรับการบริหารจัดการสินทรัพย์ ระบบฉนวนของหม้อแปลงส่วนใหญ่เป็นฉนวนกระดาษและน้ำมัน โดยมีฉนวนแข็งเป็นกระดาษคราฟท์ และฉนวนเหลวเป็นน้ำมันหม้อแปลง สภาพความเป็นฉนวนของฉนวนกระดาษเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานที่เหลือของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากหากฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเสื่อมสภาพก็สามารถเปลี่ยนถ่ายได้ตลอดอายุการใช้งาน แต่ไม่สามารถทำได้กับฉนวนกระดาษ ดังนั้นการตรวจสอบสภาพของฉนวนกระดาษจึงมีความสำคัญ แต่การตรวจสอบด้วยระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน (DP) ทำได้ค่อนข้างยาก บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการประเมินสภาพฉนวนหม้อแปลงโดยใช้ผลการทดสอบทางด้านเทคนิคของฉนวนน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วยผลการทดสอบด้านคุณภาพน้ำมัน การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปน และสารประกอบฟิวแรนในน้ำมันหม้อแปลง นำผลการทดสอบดังกล่าวมาประมวลเป็นดัชนี CFAE ซึ่งบ่งบอกการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลง และมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของ CO_2/CO ตามมาตรฐาน IEEE Std. C57.104, IEC 60599 หากค่า CFAE อยู่ระหว่าง 2 ถึง -5.3 และอัตราส่วนของ CO_2/CO อยู่ระหว่าง 3 ถึง 10 สามารถมั่นใจได้ว่าฉนวนกระดาษยังอยู่ในสภาพสามารถใช้งานได้ ยังไม่เกิดการย่อยสลายตัวอย่างรุนแรงภายในหม้อแปลง แต่หากผลขัดแย้งกันก็จะใช้ผลการทดสอบด้านคุณภาพน้ำมันมาพิจารณาเพิ่มเติม

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง สารประกอบฟิวแรน ก๊าซเจือปนในน้ำมัน ระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน ฉนวนกระดาษและน้ำมัน

Abstract

Power Transformers are high-value primary equipment and important components in high voltage networks system. This makes the determination of transformer's remaining life very important for asset management. The insulation system of most transformers is oil-paper insulation having kraft paper as solid insulation and transformer oil as liquid insulation. The insulating condition of the insulating paper is an important factor affecting the remaining life of a transformer. This is because if the transformer oil insulation deteriorates, it can be replaced throughout its service life; however, this cannot be done with the insulating paper. Therefore, checking of insulating paper's condition is essential; but, to do it with the degree of polymerization (DP) is very difficult. This article proposed an approach to assess the transformer insulation condition by using results from the transformer oil insulator technical test consisting of oil quality testing, dissolved gas analysis, and furan compound testing in transformer oil. They were processed into the CFAE index indicating the degeneration of the insulating paper inside a transformer and used to compare with the CO_2/CO ratio according to IEEE Std. C57.104 and IEC 60599 standards. If the CFAE index was between -2 and -5.3 and the CO_2/CO ratio was between 3 and 10, it would ensure that the insulating paper was in usable condition and was not severely degraded inside the transformer. However, if the results conflicted, the results of the oil quality test would be used for further consideration.

Keywords: Power transformer, Furans compound, Dissolved gas analysis, Degree of polymerization, Oil-paper insulation

1. บทนำ

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์หลักที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบเครือข่ายไฟฟ้าแรงสูงและมีราคาต้นทุนที่สูงมาก ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 60 ของเงินลงทุนทั้งหมดสำหรับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง [1] หากหม้อแปลงเกิดความเสียหายนอกจากจะทำให้ระบบสาธารณสุขภาคที่เกี่ยวข้องกับการบริการทางด้านไฟฟ้าหยุดชะงักลงแล้วยังส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ในระบบ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายทั้งในส่วนของการหม้อแปลงไฟฟ้าและความเสียหายในงานด้านบริการเมื่อความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาหม้อแปลงอย่างเหมาะสม ทำให้ต้องมีวิธีการประเมินสภาพของหม้อแปลงอย่างมีประสิทธิภาพถูกต้องตามสภาพการใช้งานและผลการทดสอบระหว่างให้บริการ [2]

โดยหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่รับภาระหนักตลอดเวลาการใช้งาน จึงทำให้ประสบปัญหาเกี่ยวกับความเครียดทางไฟฟ้า ความร้อน ปฏิกริยาทางเคมี และมลภาวะจากสภาพแวดล้อมภายนอกเป็นประจำ [3] ภายในของหม้อแปลงโดยส่วนใหญ่จะมีระบบความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนแข็งคือกระดาษคราฟท์ และฉนวนเหลวคือน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งสภาพความเป็นฉนวนของฉนวนกระดาษเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นฉนวนกระดาษจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพหรือสุขภาพของหม้อแปลง [4]-[6]

เนื่องจากหากฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเสื่อมสภาพก็สามารถเปลี่ยนถ่ายน้ำมันได้ตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงหรืออาจนำไปปรับปรุงแล้วนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ แต่การเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ เนื่องจากฉนวนกระดาษไม่สามารถฟื้นฟูหรือบำรุงรักษาให้สภาพความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและความแข็งแรงเชิงกลให้กลับมามีอยู่ในสภาพใช้งานใหม่ได้อีก [7] ดังนั้นจึงต้องมีการบำรุงรักษาหม้อแปลงเชิงป้องกัน (Preventive maintenance) อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการเพื่อให้ใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมีระยะเวลาใช้งานที่ยาวนาน [8] โดยทั่วไปหม้อแปลงหลังจากผลิตจากโรงงานผู้ผลิตมักกำหนดอายุขัยของหม้อแปลงไว้ที่มากกว่า 40 ปี ซึ่งพบได้ว่าหม้อแปลงที่ให้บริการอยู่บางเครื่องอาจมีอายุใกล้เคียงหรือเกินกว่าค่าที่กำหนดแต่ยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่เมื่อเวลาผ่านไปหม้อแปลงได้รับความเครียดทางไฟฟ้าและเกิดปฏิกริยาทางเคมี ซึ่งเกิดขึ้นภายในหม้อแปลงโดยมี 4 ปัจจัยหลักที่กระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสภาพ คือ อุณหภูมิสะสมที่สูง ออกซิเจน ความชื้น และความเป็นกรด กระตุ้นให้เกิดปฏิกริยาทางเคมีทาง ความร้อน (Thermal), ออกซิเดชัน และไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากกระบวนการปฏิกริยาทางเคมีเช่น ก๊าซ ความชื้น กรด ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง [5], [9]-[11] ส่งผลกระทบต่อสภาพฉนวนกระดาษและคุณสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าของหม้อแปลงจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะเวลาการใช้งาน ทำให้หม้อแปลงมีโอกาสเกิดความล้มเหลวมากขึ้น ดังนั้นการสิ้นสุดความเป็นฉนวนของฉนวนกระดาษจะเป็นการ

สิ้นสุดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงต้องให้ความสำคัญกับการประเมินสภาพฉนวนกระดาษ

องค์ประกอบของฉนวนกระดาษที่ใช้ในหม้อแปลงมีส่วนประกอบโดยน้ำหนักดังนี้ 90% เป็นเซลลูโลส 6% ถึง 7% เป็นเอมิเซลลูโลส และ 3% ถึง 4% เป็นลิกนิน มีสูตรโครงสร้างทางโมเลกุลเป็น $(C_5H_{10}O_5)$ [12] ซึ่งจะเห็นว่าเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญสำหรับฉนวนกระดาษ ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติมีจำนวนหน่วยกลูโคสของโมโนเมอร์แสดงระดับพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization ; DP) หรือสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบไปด้วยห่วงโซ่สายตรงของกลูโคส โดยทั่วไปจำนวนเฉลี่ยต่อห่วงโซ่ในแต่ละห่วงโซ่จะอยู่ในช่วง 1100 ถึง 1500 หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum heat pump dryer) จะลดลงเหลือประมาณ 1000 ถึง 1200 [6], [13] เมื่อเวลาผ่านไปห่วงโซ่จะขาดออกจากกันเป็นผลมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลและความเป็นฉนวนของฉนวนกระดาษลดลง ในที่สุดก็จะทำให้ระบบฉนวนหม้อแปลงเกิดความล้มเหลว [6], [14], [15] โดยปกติแล้วระดับการย่อยสลายของฉนวนกระดาษวัดได้จากค่า DP โดยจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60450 สำหรับหม้อแปลงใหม่หลังจากผ่านกระบวนการผลิตส่งมอบให้กับลูกค้าค่า DP โดยเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 1000 ถึง 1200 และลดลงตามระยะเวลาการให้บริการของหม้อแปลงไฟฟ้า การสิ้นสุดอายุการใช้งานของหม้อแปลงโดยทั่วไปค่า DP จะอยู่ที่ประมาณ 200 เมื่อถึงจุดนี้กระดาษจะสูญเสียความแข็งแรงเชิงกลและความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า [15], [16] โดยทั่วไปมักไม่ทดสอบหาค่า DP โดยตรง เพราะเป็นการทดสอบฉนวนเชิงทำลาย และหากว่าหม้อแปลงไฟฟ้าให้บริการอยู่ก็จำเป็นต้องหยุดจ่ายไฟฟ้าชั่วคราวเพื่อทำการเปิดฝาดั้วถึงแล้วเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนฉนวนกระดาษภายในบริเวณที่เกิดความร้อนสูงที่สุดไปทำการตรวจสอบจึงจะได้ค่าแม่นยำ ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมทำตอนหม้อแปลงหยุดให้บริการหรือปลดประจำการแล้ว

ดังนั้นจึงเห็นได้ว่างานวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาส่วนใหญ่จึงไม่วิเคราะห์หาอายุการใช้งานของหม้อแปลงหรือทำนายอายุการใช้งานที่เหลือจากการตรวจสอบค่า DP โดยตรง เพราะแนวทางนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานานถึงแม้จะมีความแม่นยำสูง [7] แต่มีวิธีการตรวจสอบอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ตัวบ่งชี้ทางเคมีที่ละลายอยู่ในน้ำมันซึ่งเป็นการทดสอบเชิงไม่ทำลายคือการวิเคราะห์สารประกอบฟิวราน (Furans analysis) คือกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของฉนวนกระดาษ เมื่อเซลลูโลสเสื่อมสภาพลงส่งผลให้กลุ่มพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่คอยจับยึดโมเลกุลของกลูโคสจะแตกตัวออกหลุดออกมาจากโครงสร้างพันธะของเซลลูโลส ทำให้มีการปลดปล่อยโมเลกุลกลูโคสอิสระเข้าไปเจือปนในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยกลูโคสซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีเสถียรภาพจะปรับสมดุลกลายเป็นสารประกอบฟิวราน [17], [18] ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายดำเนินการภายใต้ความร้อนสูง การเกิดออกซิเดชัน กรด ความชื้น ซึ่งเป็น

กระบวนการเร่งทำลายความเป็นฉนวนกระดาษและฉนวนน้ำมัน จากนั้นสารประกอบฟูรานจะเป็นโมเลกุลที่มีเสถียรภาพ ซึ่งจะถูกรังมาทดแทนในกรณีที่เกิดการย่อยสลายหรือฉนวนกระดาษมีการเสื่อมสภาพเท่านั้น [9], [10], [14]

ส่วนใหญ่มักตรวจสอบพบสารประกอบฟูราน 5 ชนิดคือ

1. 2-furaldehyde (2FAL)
2. 5-methyl-2-furaldehyde (5M2F)
3. 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde (5H2F)
4. 2-acetyl furan (2ACF)
5. 2-furfural (2FOL)

ปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบฟูรานสามารถหาได้โดยใช้โครมาโทกราฟีของเหลวประสิทธิภาพสูง (High performance liquid chromatography) วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D5837 และ IEC 61198 จากสารประกอบฟูรานทั้ง 5 ชนิด ความเข้มข้นของสาร 2FAL ถือว่าเป็นสารประกอบหลักสำคัญที่เกิดจากการย่อยสลายฉนวนกระดาษ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากมีอัตราการเกิดและเสถียรภาพการถูกย่อยสลายค่อนข้างสูงกว่าสารประกอบชนิดอื่น ๆ เมื่อหม้อแปลงมีอายุมากขึ้นสารประกอบเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นเจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง [14], [18]

ดังนั้นค่าความเข้มข้นของสาร 2FAL จึงสามารถนำไปประเมินค่า DP โดยประมาณ จากสมการแบบจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ [18], [19] แต่บางงานวิจัยนำค่าความเข้มข้นของสารประกอบฟูรานทั้ง 5 ชนิดนำไปประเมินค่า DP โดยประมาณ สำหรับฉนวนกระดาษที่ผ่านการอัดเกรดด้วยความร้อน (Thermally upgraded kraft paper, TUK paper) [18] และสามารถทราบอายุที่เหลือของฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลง ซึ่งอายุที่เหลืออยู่ของฉนวนกระดาษก็คืออายุที่เหลือของหม้อแปลงกำลังที่ยังคงสามารถให้บริการได้ [7] อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณความเข้มข้น 2FAL ที่เจือปนในน้ำมันเพียงอย่างเดียว อาจให้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องหรือคลาดเคลื่อนได้ ปัญหาหลักในการใช้ค่าความเข้มข้นของ 2FAL เพื่อทำนายค่า DP โดยประมาณของฉนวนกระดาษ เนื่องจากความเข้มข้นของ 2FAL นั้นอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยด้านอื่นที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่า DP ของฉนวนกระดาษ อาจไม่ได้เป็นผลโดยตรงจากการย่อยสลายของเซลลูโลสของฉนวนกระดาษเท่านั้นแต่อาจเป็นผลมาจากแผ่นรองรับแรงกด (Pressboard) ซึ่งทำมาจากเยื่อไม้ซ้อนทับกันหลายชั้นไว้รองรับแรงกดระหว่างขดลวดทางด้านแรงต่ำ [6], [20], [21] และในส่วนของปัจจัยทางด้านปฏิกิริยาเคมีของออกซิเจน ความชื้น และกรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 2FAL [16], [18]

Pahlavanpour [22] แนะนำว่าสารประกอบฟูรานควรมีความเข้มข้นของ 2FAL น้อยกว่า 0.1 ppm และไม่ควรมากเกิน 1 ppm แต่อย่างไรก็ตามมีหม้อแปลงเก่าที่ใช้งานอยู่หลายเครื่องมีปริมาณความเข้มข้นสูงถึง 10 ppm

จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่า DP โดยใช้ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของ CO_2/CO (Ratio CO_2/CO)

ซึ่งเป็นก๊าซที่ละลายเจือปนอยู่กับน้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากก๊าซเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายขั้นสุดท้ายของเซลลูโลส จึงสามารถใช้ความเข้มข้นของก๊าซหาอัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษได้ โดยค่าอัตราส่วนของ CO_2/CO ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 10 แสดงถึงสถานะของฉนวนกระดาษยังอยู่ในสภาพปกติ สามารถตรวจสอบได้จากกระบวนการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved gas analysis ; DGA) ซึ่งระบุไว้ในมาตรฐาน IEC 60599 , ASTM D2945 และ IEEE Std. C57.104

ข้อดีของการใช้อัตราส่วน CO_2/CO เหตุผลเนื่องจาก 1. อัตราส่วน CO_2/CO มีเสถียรภาพในการเกิดสูง 2. หากเกิดการรั่วไหลของก๊าซจากบรรยากาศภายนอกเข้าสู่ภายในหม้อแปลงอัตราส่วนของ CO_2/CO นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงมากเท่ากับการพิจารณาจากความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 และ CO ถ้าหากมีค่าน้อยกว่า 3 อาจบ่งชี้ว่าฉนวนกระดาษได้รับผลกระทบจากความผิดปกติ ในบางกรณี CO อาจสะสมอยู่ในหม้อแปลงและส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนของ CO_2/CO มีค่าต่ำกว่า 3 ในขณะที่ภายในหม้อแปลงไม่มีปัญหาใดเกิดขึ้น ในกรณีนี้ควรทำการทดสอบความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงจำพวกก๊าซไฮโดรคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มเติม ถ้าหากอัตราส่วนของ CO_2/CO สูงเกินกว่า 10 ซึ่งเกิดจากความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 สูงเกินไป อาจบ่งบอกถึงความเสื่อมสภาพของฉนวน เนื่องจากความร้อนสูงเกินไปในฉนวนกระดาษหรืออาจเกิดออกซิเดชันของน้ำมันโดยเฉพาะในหม้อแปลงประเภทแบบมีตัวถังสำรองน้ำมันเพื่อระบายความร้อนของน้ำมันในหม้อแปลง (Conservator tank) [16], [23], [24]

เพราะฉะนั้นจึงมีการใช้ตัวบ่งชี้ 2FAL, CO , CO_2 และ CO_2/CO ในการประเมินความเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ อย่างไรก็ตามการศึกษาในงานวิจัยต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวบ่งชี้เหล่านี้เพียงอย่างเดียวอาจนำไปสู่การวินิจฉัยการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษที่ไม่ถูกต้อง จึงมีการนำเสนอเทคนิควิธีการใช้ดัชนี CFA ซึ่งจะพิจารณาผลกระทบของตัวบ่งชี้ 4 ตัว ที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกัน ได้แก่ CO_2 , CO , C_2H_2 และ 2FAL โดยการพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างอายุของหม้อแปลงกับค่า DGA และ 2FAL ซึ่งจากผลการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficients) [25] ตัวบ่งชี้ CO_2+CO , C_2H_2 และ 2FAL กับอายุของหม้อแปลงที่ใช้งานจนถึงสิ้นสุดการใช้งานมีค่าค่อนข้างสูง จึงได้สมการดัชนี CFA ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการประเมินความเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ โดยมีค่าอยู่ในช่วง -2 ถึง -5.3 ถือว่าไม่เกิดเหตุการณ์รุนแรงต่อสภาพความเป็นฉนวนกระดาษยังคงอยู่ในสภาพค่อนข้างปกติ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคุณภาพน้ำมันเช่น แรงตึงผิวของน้ำมัน (Interfacial tension, IFT), แรงดันเบรกดาวน์ (Dielectric breakdown voltage, DBV) เพื่อให้ทราบแนวโน้มของฉนวนน้ำมันเสื่อมสภาพมากขึ้นเพียงใดส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ [23]

ในบทความนี้จะเป็นการศึกษาที่ใช้ผลการทดสอบทางด้านเทคนิคของฉนวนน้ำมันภายในหม้อแปลงจำนวน 33 เครื่อง ซึ่งมีการทดสอบคุณภาพน้ำมัน (Oil quality) ซึ่งมีผลการทดสอบคุณภาพน้ำมันเช่น ความเป็นกรดในน้ำมัน (Acidity), ความชื้นในน้ำมัน (Water content in oil, Water), ความชื้นในกระดาษ (Per cent water in paper insulation, % WaterPaper), Color Number, IFT และ DBV ส่วนการทดสอบเพิ่มเติม DGA และความเข้มข้น 2FAL ส่วนค่า DP ของฉนวนกระดาษที่ผ่านกระบวนการอัดเกรดความร้อน โดยนำความเข้มข้น 2FAL แทนในสมการ Stebbins และคณะ [19] เพื่อให้ได้ค่า DP โดยประมาณ ซึ่งเป็นตัวแทนข้อมูลในการทดสอบฉนวนกระดาษของหม้อแปลงแต่ละเครื่อง จากนั้นจะทำการตรวจสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DP กับผลการทดสอบคุณภาพน้ำมันและก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง การกำหนดพารามิเตอร์ชนิดก๊าซและหัวข้อการทดสอบที่นำมาใช้ในการประเมินสภาพของฉนวนหม้อแปลงในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และนำเสนอวิธีการใช้ดัชนี CFAE ซึ่งจะพิจารณาผลกระทบของตัวบ่งชี้ 5 ตัวที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกัน ได้แก่ CO_2 , CO , C_2H_4 , C_2H_2 และ 2FAL พร้อมกับเปรียบเทียบข้อมูล CO_2/CO และคุณภาพน้ำมัน

2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษ

2.1 Thermal Degradation

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 130 ถึง 150°C ซึ่งถือว่าเป็นช่วงอุณหภูมิจุดร้อนปกติในการทำงานของหม้อแปลง ช่วงอุณหภูมินี้ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของฉนวนกระดาษทำให้เซลลูโลสเสื่อมสภาพ ลดระดับค่าพอลิเมอร์ไฮดรอกซีและความแข็งแรงเชิงกลของกระดาษให้ต่ำลง (Figure 1) [5]

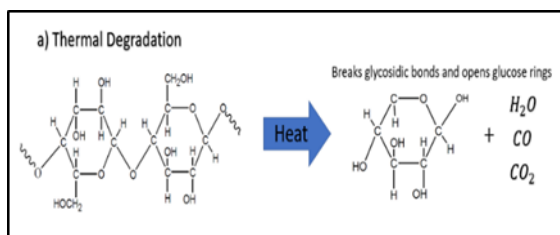


Figure 1 Thermal degradation

2.2 Oxidative Degradation

โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสมีความไวต่อการเกิดออกซิเดชันสูง กลุ่มของไฮดรอกซิล เป็นบริเวณโครงสร้างที่อ่อนแอจึงถูกออกซิไดซ์ซึ่งเกิดกลุ่มคาร์บอนิลและกรดคาร์บอกซิลิกทำให้พันธะไกลโคซิดิกของโครงสร้างกลูโคสอ่อนตัวลง และสามารถนำไปสู่การแตกตัวของห่วงโซ่ให้สั้นลงความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้เกิดโมเลกุลของน้ำขึ้นระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ (Figure 2) [9], [14]

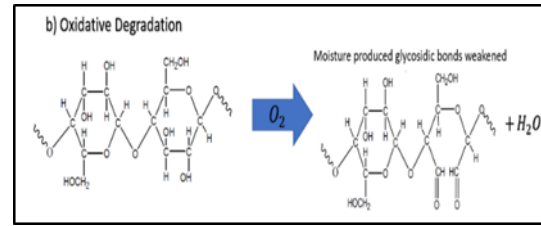


Figure 2 Oxidative degradation

2.3 Hydrolytic Degradation

ไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากน้ำและกรดภายในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งทำลายห่วงโซ่โพลิเมอร์ของเซลลูโลส ปฏิกิริยานี้ก่อให้เกิดโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสอิสระซึ่งจะสลายตัวต่อไปเพื่อสร้างสารประกอบฟูแรนและน้ำ หลังจากนั้นโมเลกุลน้ำจะยอมให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสต่อไปวนเวียนเป็นวัฏจักร [10] ฉนวนกระดาษควรจะถูกทำให้แห้งสนิทก่อนนำไปใช้งานเพื่อยับยั้งกระบวนการไฮโดรไลซิส หากฉนวนกระดาษผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนหรือออกซิเดชัน ซึ่งเกิดความชื้นขึ้นภายใน กระบวนการย่อยสลายไฮโดรไลติกก็จะยิ่งเกิดขึ้น ทำให้ฉนวนกระดาษเสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น (Figure 3) [14]

การสะสมกรดในน้ำมันนำไปสู่การสะสมของตะกอนที่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ ซึ่งจะลดความเป็นฉนวนของน้ำมันและการถ่ายเทความร้อน ส่งผลกระทบต่อสภาพความเป็นฉนวนกระดาษ เนื่องจากได้รับความร้อนสะสมจากฉนวนน้ำมัน [11]

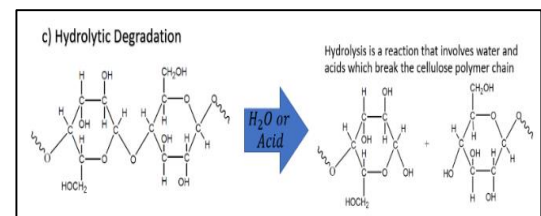


Figure 3 Hydrolytic degradation

3. กระบวนการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis, DGA)

เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับใช้ในการตรวจสอบสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถระบุความผิดปกติ โดยไม่รบกวนการให้บริการ แนวทางนี้มาพร้อมกับการวิเคราะห์ก๊าซที่ติดไฟได้และก๊าซที่ไม่สามารถติดไฟได้ที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง ทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันและกระดาษเปลี่ยนสภาพไป นอกจากนี้ผลการเร่งปฏิกิริยาของออกซิเจน ความชื้น และกรด ที่เกิดขึ้นในฉนวนกระดาษกับน้ำมันหม้อแปลงพร้อมกับปัจจัยทางความร้อนจะกระตุ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยา และทำให้เกิดก๊าซต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH_4) เอทิลีน (C_2H_4) อีเทน (C_2H_6) อะเซทิลีน (C_2H_2) โพรเพน (C_3H_8) และไพโรลีน (C_3H_6) ถูกผลิตขึ้นและละลายอยู่ภายในน้ำมันหม้อแปลง [3]

ก๊าซที่ติดไฟได้ 4 ชนิด ได้แก่ H_2 , CH_4 , C_2H_4 และ C_2H_2 ที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ความผิดปกติพร้อมภายในหม้อแปลงตามรูปแบบความผิดปกติ 6 ประเภท (PD, D1, D2, T1, T2 และ T3) แสดงใน (Table 1) [24], [26]

Table 1 Fault classification [26]

Symbol	Electrical faults	Symbol	Thermal faults
PD	Corona partial discharge	T1	$T < 300^{\circ}C$
D1	Low energy discharge	T2	$300^{\circ}C < T < 700^{\circ}C$
D2	High energy discharge	T3	$T > 700^{\circ}C$

ระดับความสำคัญของก๊าซที่เกิดจากความผิดปกติแต่ละรูปแบบภายในหม้อแปลงมีความแตกต่างกัน (Table 2) สำหรับความผิดปกติทางไฟฟ้าในฉนวนน้ำมันที่ใช้พลังงานต่ำ เช่น การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ในรูปแบบของโคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) จะสังเกตได้ว่าก๊าซ H_2 มีความสำคัญสูงสุด แต่หากเป็นความผิดปกติทางไฟฟ้าพลังงานสูงเช่นการเกิดอาร์คหรือสปาร์ค (Arcing) นอกจากก๊าซ H_2 แล้วจะมีก๊าซ C_2H_2 ที่มีความสำคัญสูงร่วมด้วย สำหรับความผิดปกติที่อุณหภูมิต่ำก๊าซ CH_4 และ C_2H_6 จะมีความสำคัญสูง ในส่วนของก๊าซ C_2H_4 มีความสำคัญสูงในความผิดปกติที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นก๊าซทั้ง 5 จึงถูกเลือกมาใช้ในการพิจารณาความสำคัญโดยขึ้นอยู่กับความผิดปกติแต่ละประเภทคือ C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6 และ H_2 [26]

4. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ CO_2/CO , DP และปริมาณสารประกอบฟูลราน 2FAL

ในทางปฏิบัติวิธีการทดสอบค่า DP มีความซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากมีความจำเป็นที่ต้องเปิดฝาดังหม้อแปลงเพื่อนำตัวอย่างฉนวนกระดาษมาทดสอบ ดังนั้นจึงเกิดงานวิจัยหลากหลายงานที่นำเสนอวิธีการประมาณค่า DP จากหลายๆปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด ความชื้น หรือประเมินจากปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบฟูลรานทั้ง 5 ชนิดที่ได้กล่าวมาข้างต้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยมีแต่ก๊าซไนโตรเจนซึ่งไม่มีก๊าซออกซิเจนเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า $100^{\circ}C$ สารประกอบฟูลรานทั้ง 5 ชนิดเกิดการย่อยสลายค่อนข้างคงที่ คือมีเจือปนอยู่ในน้ำมัน เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $100^{\circ}C$ ไม่เกิน $160^{\circ}C$ พบว่าจะเหลือสาร 2FAL, 5M2F และ 2ACF ที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน สำหรับหม้อแปลงประเภทมีตัวถังสำรองน้ำมันเปิดสู่บรรยากาศภายนอกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 70 ถึง $110^{\circ}C$ เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้สารประกอบฟูลราน 2FOL และ 5H2F เกิดการย่อยสลายหายไปเกือบจะไม่พบเจือปนในน้ำมันหม้อแปลง เพราะฉะนั้นสารประกอบฟูลรานที่เหลืออีก 3 ตัวคือ 2FAL, 5M2F และ 2ACF จึงค่อนข้างมีเสถียรภาพการเกิดแต่เมื่ออายุของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น

สาร 5M2F และ 2ACF จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และจะมีค่าต่ำกว่าสาร 2FAL เป็นอย่างมาก ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นในอัตราที่เกือบคงที่แล้วจะย่อยสลายหายไป เพราะฉะนั้นสาร 2FAL จึงมีเสถียรภาพมากกว่าสารตัวอื่น ๆ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการวินิจฉัยการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษสำหรับหม้อแปลงฉนวนน้ำมันได้ [18]

วิธีการประเมินจากปริมาณสารประกอบฟูลรานถือว่าเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมากและมีความเชื่อถือได้ในระดับหนึ่งดังนั้นจึงมีผู้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารประกอบฟูลราน 2FAL ในน้ำมันกับค่า DP ของฉนวนกระดาษ โดยไม่ต้องใช้การตรวจสอบแบบทำลายโดยการตัดกระดาษเพื่อไปทดสอบหาค่า DP โดยตรงเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลง

ผลจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน ทำให้ผลลัพธ์ค่า DP มีค่าต่างกัน (Figure 4) ในตัวอย่างใช้ผลจากน้ำมันหม้อแปลงเครื่องเดียวกัน [28] เมื่อค่า DP ลดลงต่ำกว่า 600 การทำนายค่าฟูลรานในแต่ละโมเดลจะแตกต่างกันออกไป จะเห็นได้ว่าสมการ Chendong สามารถทำนายค่าได้ต่ำกว่าหรือฉนวนเสื่อมสภาพเร็วกว่าสมการอื่น ๆ เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบฟูลราน 2FAL ในน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้น ทำให้วิศวกรสามารถเฝ้าระวังฉนวนภายในหม้อแปลงชนิดฉนวนกระดาษkraft แบบธรรมดาไม่ผ่านกระบวนการอัพเกรด (Non-upgraded kraft paper) ได้

นอกจากนี้ฉนวนกระดาษkraft แบบปรับให้มีความทนอุณหภูมิสูง (Thermally upgraded kraft paper, TUK paper) กระบวนการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการทนความร้อนและสามารถควบคุมอัตราการย่อยสลายเพื่อยับยั้งการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษให้เกิดได้ช้าลง ซึ่งเกิดจากการเติมสารไดไซแอนไดไมด์ (Dicyandiamide) เพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบฟูลรานจากการย่อยสลายของฉนวนกระดาษที่เจือปนในน้ำมันให้ลดลงได้ โดยส่วนใหญ่ความเข้มข้นของ 2FAL จะมีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการยับยั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้ป้องกันการเกิดกรดขึ้นภายในน้ำมันหม้อแปลง Stebbins et al. [19] ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ DP และความเข้มข้นของ 2FAL โดยทำการปรับเปลี่ยนจากสมการของ Chendong เพื่อใช้สำหรับฉนวนกระดาษที่ผ่านการปรับให้ทนอุณหภูมิสูงได้ ดังสมการที่ (1) ส่วนสมการที่ (2) จะใช้สารประกอบฟูลรานทั้ง 5 ชนิด มีการนำเสนอการเปรียบเทียบโดยตรงระหว่างกระดาษแบบธรรมดากับกระดาษแบบปรับให้ทนอุณหภูมิสูง การเปรียบเทียบระดับสารประกอบฟูลรานที่ค่าทดสอบเดียวกับค่า DP เท่ากับ 200 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเป็นฉนวนของกระดาษถือว่าหมดอายุการใช้งาน สำหรับกระดาษแบบธรรมดาทดสอบแล้วพบว่ามีสารประกอบฟูลรานทั้ง 5 ชนิดรวมเท่ากับ 7,337 ppb ในขณะที่กระดาษอัพเกรดจะมีค่า 2,843 ppb [19] ซึ่งเป็นที่มาของสมการที่ (1) และ (2)

Table 2 Gas importance by faults in a transformer [26]

Cause of gas generation			H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂
Electrical faults	Insulating Oil	Corona PDs	●	○					
		Arc + Sparking PDs	●			○	●		
	Insulating paper								○
Thermal faults	Insulating Oil	Low temp.	○	●	●				
		Mid & High temp.	○	○		●			
		700°C or higher	○			●	○		
	Insulating paper							●	○
Aging	Insulating Oil		○		●				
	Insulating paper							○	●

● = High importance, ○ = Medium importance

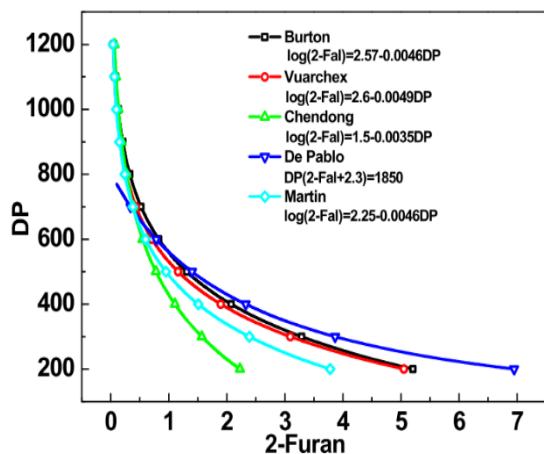


Figure 4 Comparison of different correlations of DP and 2FAL [28]

ผลจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ต่างกัน ทำให้ผลลัพธ์ค่า DP มีค่าต่างกัน (Figure 4) ในตัวอย่างใช้ผลจากน้ำมันหม้อแปลงเครื่องเดียวกัน [28] เมื่อค่า DP ลดลงต่ำกว่า 600 การทำนายค่าฟิวแรนในแต่ละโมเดลจะแตกต่างกันออกไป จะเห็นได้ว่าสมการ Chendong สามารถทำนายค่าได้ต่ำกว่าหรือฉนวนเสื่อมสภาพเร็วกว่าสมการอื่น ๆ เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบฟิวแรน 2FAL ในน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้น ทำให้วิศวกรสามารถเฝ้าระวังฉนวนภายในหม้อแปลงชนิดฉนวนกระดาษkraft แบบธรรมดาไม่ผ่านกระบวนการอัพเกรด (Non-upgraded kraft paper) ได้

นอกจากนี้ฉนวนกระดาษkraft แบบปรับให้มีความทนอุณหภูมิสูง (Thermally upgraded kraft paper, TUK paper) กระบวนการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการทนความร้อนและสามารถควบคุมอัตราการย่อยสลายเพื่อยับยั้งการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษให้เกิดได้ช้าลง ซึ่งเกิดจากการเติมสารไดไซแอนไดไมด์ (Dicyandiamide) เพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบฟิวแรนจากการย่อยสลายของฉนวนกระดาษที่เจือปนในน้ำมันให้ลดลงได้ โดยส่วนใหญ่ความเข้มข้นของ

2FAL จะมีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการยับยั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้ป้องกันการเกิดกรดขึ้นภายในน้ำมันหม้อแปลง Stebbins และคณะ [19] ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ DP และความเข้มข้นของ 2FAL โดยทำการปรับเปลี่ยนจากสมการของ Chendong เพื่อใช้สำหรับฉนวนกระดาษที่ผ่านการปรับให้ทนอุณหภูมิสูงได้ ดังสมการที่ (1) ส่วนสมการที่ (2) จะใช้สารประกอบฟิวแรนทั้ง 5 ชนิด มีการนำเสนอการเปรียบเทียบโดยตรงระหว่างกระดาษแบบธรรมดา กับกระดาษแบบปรับให้ทนอุณหภูมิสูง การเปรียบเทียบระดับสารประกอบฟิวแรนที่ค่าทดสอบเดียวกับค่า DP เท่ากับ 200 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเป็นฉนวนของกระดาษถือว่าหมดอายุการใช้งาน สำหรับกระดาษแบบธรรมดาทดสอบแล้วพบว่า มีสารประกอบฟิวแรนทั้ง 5 ชนิดรวมเท่ากับ 7,337 ppb ในขณะที่กระดาษอัพเกรดจะมีค่า 2,843 ppb [19] ซึ่งเป็นที่มาของสมการที่ (1) และ (2)

$$DP = \frac{\log_{10}(2FAL \times 0.88) - 4.51}{-0.0035} \quad (1)$$

$$DP = \frac{\log_{10}(\text{Total_furan}) - 4.0355}{-0.002908} \quad (2)$$

โดยที่

DP = ระดับพอลิเมอร์เซชันของฉนวนกระดาษ

2FAL = 2-furaldehyde (ppb)

Total_furan = สารประกอบฟิวแรนรวมทั้ง 5 ชนิด (ppb)

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของหม้อแปลงตั้งแต่ยังให้บริการอยู่จนถึงหม้อแปลงยกเลิกให้บริการมีการตรวจสอบฉนวนกระดาษโดยตรงเชิงทำลาย เพื่อให้ได้ค่า DP จากนั้นมีการทดสอบ DGA เพื่อหาความเข้มข้นของก๊าซ CO กับ CO₂ และความเข้มข้นของสารประกอบฟิวแรน 2FAL ที่ละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง นำข้อมูลมาแสดงในกราฟ 3 มิติ (Figure 5) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความเป็นฉนวนของกระดาษลดลง (DP) ค่าความเข้มข้นของ 2FAL กับค่าอัตราส่วน CO₂/CO จะมีค่าสูง (Table 3) แสดงให้เห็นว่าช่วงของอัตราส่วนความเข้มข้น

CO₂/CO สามารถทำนายค่าช่วง DP โดยประมาณของฉนวนกระดาษได้ และทราบถึงสภาพความเป็นฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลง [16]

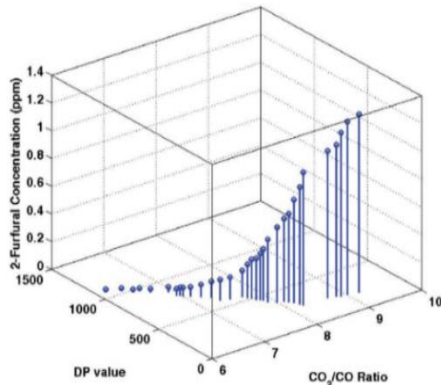


Figure 5 3D plot of the measured DP values, CO₂/CO Ratio, and 2-furfural concentrations [16]

Table 3 CO₂/CO ratio ranges and the corresponding degree of polymerization (DP) ranges [16]

Ratio CO ₂ /CO (R)	DP value	Condition
R ≤ 7.4	> 600	Healthy
7.4 < R < 8.0	400 - 650	Normal
8 ≤ R < 8.7	250 - 450	Weak
R ≥ 8.7	< 250	End of life

5. กรณีศึกษาเทคนิควิธีการคำนวณดัชนี CFAE

กรณีศึกษาที่ใช้ผลการทดสอบทางด้านเทคนิคของฉนวนน้ำมันจากการตรวจสอบผลคุณภาพน้ำมันและก๊าซเจือปนในน้ำมันภายในหม้อแปลงจำนวน 33 เครื่อง ที่มีอายุการใช้งานอยู่ในช่วง 16 ถึง 28 ปี โดยผลลัพธ์ของค่า DP ประมาณได้จากการแทนค่าความเข้มข้นสารประกอบฟอรานของ 2FAL ในสมการที่ (1) โดยการพิจารณาพารามิเตอร์ CO+CO₂, 2FAL, C₂H₂ และ C₂H₄ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับค่า DP ของฉนวนกระดาษค่อนข้างสูงซึ่งเกี่ยวข้องกับเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนกระดาษแสดงดังสมการที่ (3) โดยความสัมพันธ์ค่าดัชนี CFAE กับค่า DP ของฉนวนกระดาษ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ได้เท่ากับ 0.9406 ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกหรือความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกันค่อนข้างสูง ส่วนการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นเดียวหรือการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Regression) (Figure 6) แสดงสมการเส้นตรงระหว่างดัชนี CFAE กับค่า DP ของฉนวนกระดาษ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างสูง โดยพิจารณาจากค่า R-Square เป็นค่าที่แสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระหรือ CFAE ที่อยู่ในสมการสามารถอธิบายการแปรผันของตัวแปรตามหรือ DP ได้ 88.48% ดังนั้นความแปรปรวนของ DP อีก 11.52% นั้นอธิบายด้วยปัจจัยและผลกระทบ

อื่น ๆ ดังนั้นดัชนี CFAE จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นในฉนวนกระดาษของหม้อแปลงได้

$$CFAE = \log_{10} \left(\frac{1}{\frac{(CO + CO_2) + C_2H_4}{(100 \times 2FAL) + C_2H_2}} \right) \quad (3)$$

โดยที่

CO = Carbon monoxide concentration (ppm)

CO₂ = Carbon dioxide concentration (ppm)

2FAL = 2-furaldehyde (ppm)

C₂H₂ = Acetylene concentration (ppm)

C₂H₄ = Ethylene concentration (ppm)

ข้อมูลใน (Table 4 และ 5) แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างการทดสอบคุณภาพน้ำมันกับค่า DP และการทดสอบก๊าซเจือปนในน้ำมันกับค่า DP ตามลำดับ ส่วนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น (Figure 7 - 14) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์แปรผันตรงหรือผกผันมีค่าช่วงอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ส่วนตัวแปร P-value บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่มีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 5% สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข P-value สำหรับการทดสอบคุณภาพน้ำมันคือ Water, %WaterPaper, Color Number, IFT และ Acidity ตามลำดับ ส่วนการทดสอบก๊าซเจือปนในน้ำมัน คือ CO₂ และ CO ได้มีการคำนวณเพิ่มเติมคือ CO+CO₂ กับ Ratio CO₂/CO ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงสอดคล้องกับค่า P-value ซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติ

เหตุผลในการพิจารณาปริมาณก๊าซ C₂H₂ เนื่องจากความสำคัญในการผลิตก๊าซชนิดนี้เกิดจากความผิดปกติของทางไฟฟ้า (Electrical faults) ที่เกิดภายในหม้อแปลงในลักษณะการดีสชาร์จพลังงานสูง (High energy discharge) หรือการเกิดอาร์คอย่างรุนแรงเป็นหลัก ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนของกระดาษ เป็นเหตุผลทำให้เกิดความร้อนตามมาที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1200°C เพราะฉะนั้นก๊าซนี้จะไม่ถูกผลิตภายใต้สภาวะการทำงานแบบปกติของหม้อแปลง [2, 3] แต่ผลการทดสอบหม้อแปลงจำนวนทั้งหมดโดยส่วนใหญ่ก๊าซชนิดนี้แทบไม่มีละลายอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงเลย เพราะฉะนั้นเราจะพิจารณาค่าก๊าซ C₂H₄ เพิ่มเติมซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงกว่าก๊าซชนิดอื่น ๆ รองลงมาจากก๊าซ C₂H₂ เนื่องจากสาเหตุหลักในการเกิดก๊าซชนิดนี้จากความผิดปกติทางไฟฟ้าและความร้อนภายในหม้อแปลง โดยจุดเด่นคือความร้อนที่เกิดขึ้นภายในน้ำมันตั้งแต่ 300 ถึง 700°C หรืออาจจะมากกว่า 700°C ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเป็นฉนวนของกระดาษและน้ำมันในหม้อแปลงจะยิ่งเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

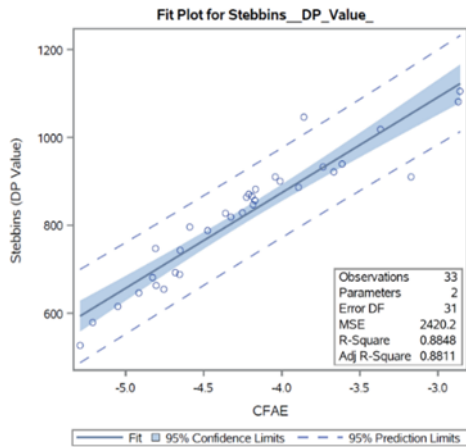


Figure 6 Correlation of CFAE index with DP

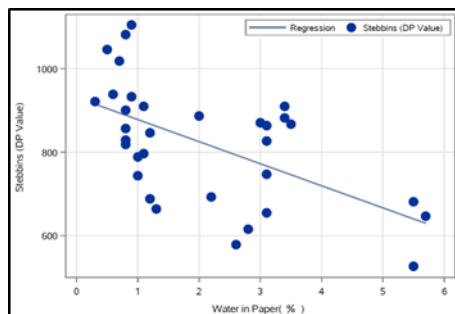


Figure 7 Scatterplot of Water versus DP

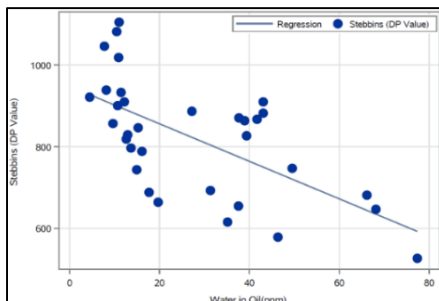


Figure 8 Scatterplot %WaterPaper versus DP

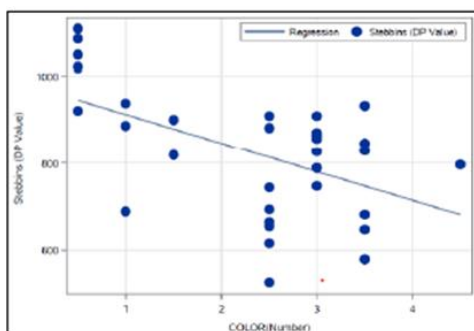


Figure 9 Scatterplot color number versus DP

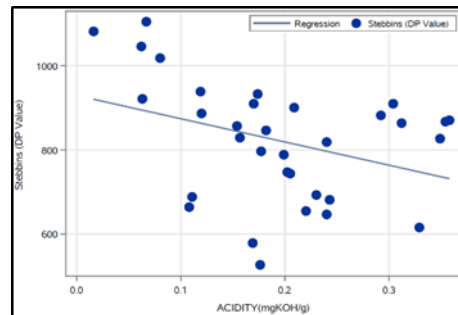


Figure 10 Scatterplot IFT versus DP

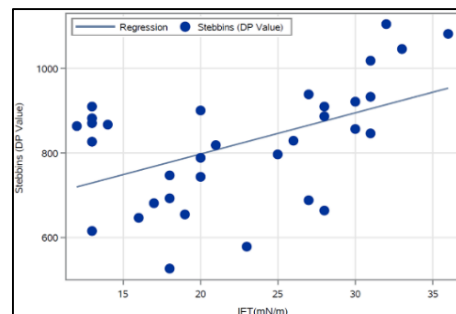


Figure 11 Scatterplot Acidity of versus DP

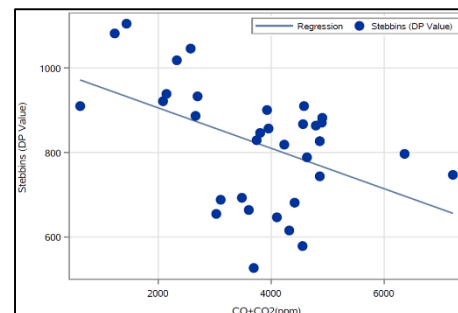


Figure 12 Scatterplot of CO+CO₂ versus DP

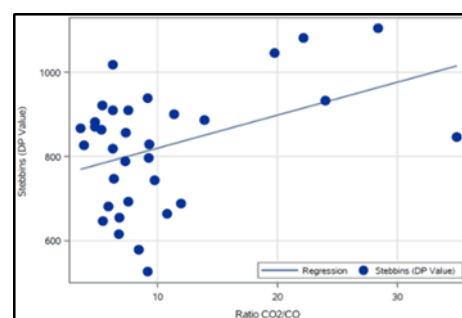


Figure 13 Scatterplot CO₂/CO ratio versus DP

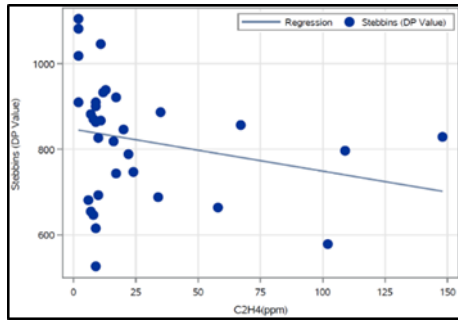
Figure 14 Scatterplot C_2H_4 versus DP

Table 4 Correlation coefficient between oil quality and DP

Dielectric Characteristics	r	P-value
DBV (kV)	0.32466	0.0653
IFT (mN/m)	0.49172	0.0037
Color Number	-0.52072	0.0019
Acidity (mg KOH/g)	-0.35247	0.0442
Water (ppm)	-0.58973	0.0003
%WaterPaper (%)	-0.56715	0.0006

Table 5 Correlation coefficient between dissolved gas and DP

Dissolved Gases	r	P-value
H_2	0.00966	0.9575
CH_4	0.14732	0.4133
C_2H_2	0.28201	0.1118
C_2H_4	-0.23497	0.1881
C_2H_6	0.14272	0.4282
N_2	-0.11749	0.5149
O_2	-0.12922	0.4735
CO	-0.31854	0.0708
CO_2	-0.47945	0.0048
CO+ CO_2	-0.4688	0.0059
Ratio CO_2/CO	0.40479	0.0195

6. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ข้อมูลผลการทดสอบทางด้านเทคนิคเพื่อหาปริมาณก๊าซและปริมาณสารประกอบฟูลแรนในน้ำมันหม้อแปลงที่ยังคงให้บริการใช้งานอยู่ระหว่างเก็บผลการทดสอบ ส่วนค่า DP และค่าดัชนี CFAE ได้จากการคำนวณของหม้อแปลงตัวอย่างทั้ง 33 เครื่อง (Table 6)

กรณีที่ 1 พิจารณาหม้อแปลงที่มีค่าอัตราส่วน CO_2/CO เกินค่ามาตรฐานกำหนด (อยู่นอกช่วง 3 ถึง 10)

จากข้อมูลใน Table 6 พบว่ามีหม้อแปลง 9 เครื่อง จาก 33 เครื่อง ที่มีอัตราส่วน CO_2/CO เกินค่ามาตรฐาน

กำหนด แต่เมื่อพิจารณาค่าดัชนี CFAE พบว่าหม้อแปลงทั้ง 9 เครื่องนี้ยังมีค่าดัชนี CFAE อยู่ในช่วงปกติ (-2 ถึง -5.3) เมื่อปัจจัยทั้งสองที่ใช้ในการประเมินสภาพความเป็นฉนวนไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงนำผลการทดสอบทางด้านคุณภาพน้ำมัน ปริมาณก๊าซจากการทดสอบ DGA และปริมาณสารประกอบ ฟูลแรนของหม้อแปลงแต่ละเครื่องมาพิจารณาเพิ่มเติมดังแสดงใน (Table 6 และ 7) พบว่าไม่มีก๊าซใดที่เป็นตัวบ่งชี้ว่าฉนวนกระดาษของหม้อแปลงมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพ เนื่องจากผลการทดสอบหม้อแปลงทั้ง 9 เครื่องพบว่าปริมาณก๊าซและสารประกอบอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด (C_2H_2 , C_2H_4 , CO, CO_2 และ 2FAL) ค่าแรงดึงผิวมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความชื้นในน้ำมันและความชื้นในกระดาษที่มีค่าค่อนข้างต่ำซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนดแสดงใน (Table 9)

เพราะฉะนั้นจึงประเมินได้ว่าหม้อแปลงทั้ง 9 เครื่องนี้ยังคงมีสุขภาพและสภาพความเป็นฉนวนค่อนข้างดี และเมื่อตรวจสอบค่า DP ของฉนวนกระดาษเพิ่มเติมก็ยังคงพบว่าทุกเครื่องมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่สำหรับหม้อแปลง T06 กับ T07 ค่าดัชนี CFAE และ DP มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอื่น ๆ ฉนวนกระดาษอาจเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพตามระยะเวลาการใช้งานหรืออาจเกิดความผิดปกติพร่องภายในหม้อแปลง ดังนั้นจึงต้องมีการเฝ้าระวังโดยการสังเกตจากแนวโน้มผลการทดสอบในหัวข้อต่าง ๆ อย่างละเอียดมากขึ้น

กรณีที่ 2 พิจารณาหม้อแปลงที่มีค่าดัชนี CFAE ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงเครื่องอื่น ๆ โดยที่ค่าอัตราส่วน CO_2/CO ยังอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

(Table 8) แสดงข้อมูลของหม้อแปลงจำนวน 8 เครื่อง จาก 33 เครื่อง ที่มีค่าดัชนี CFAE ต่ำที่สุด โดยที่ค่าอัตราส่วน CO_2/CO ยังอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด (3 ถึง 10) เมื่อค่าดัชนี CFAE มีค่าค่อนข้างต่ำใกล้เคียงค่า -5.3 ซึ่งเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ว่าความเป็นฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลงกำลังเสื่อมสภาพ ในขณะที่อัตราส่วนของ CO_2/CO ยังมีค่าอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด จึงพิจารณาผลการทดสอบในหัวข้ออื่น ๆ ของหม้อแปลงทั้ง 8 เครื่องเพิ่มเติม จาก (Table 6 และ 8) พบว่าปริมาณก๊าซ CO+ CO_2 และ 2FAL มีค่าค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลการทดสอบด้านคุณภาพน้ำมัน เช่น แรงดึงผิวของน้ำมัน พบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำ และความชื้นในน้ำมันและกระดาษ พบว่ามีค่าค่อนข้างสูงซึ่งเกินช่วงมาตรฐานกำหนดแสดงใน (Table 9)

จากทั้ง 2 กรณีจะเห็นได้ว่าการใช้อัตราส่วนของ CO_2/CO อาจไม่สามารถบ่งบอกสถานะ การย่อยสลายของฉนวนกระดาษภายในหม้อแปลงได้แม่นยำนัก การนำดัชนี CFAE มาพิจารณาร่วมด้วยช่วยทำให้การประเมินสภาพความเป็นฉนวนกระดาษของหม้อแปลงมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยพิจารณาจากความสอดคล้องกับผลการทดสอบอื่น ๆ

Table 6 Inspection data of 33 transformers

TR	C ₂ H ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	Ratio CO ₂ /CO	CO ₂ +CO (ppm)	2FAL (ppm)	Stebbins (DP value)	Age (years)	CFAE	Compare CO ₂ /CO and DP values in Table 3
T01	0	22	557	4081	7.3	4638	0.064	788	28	-4.5	Yes
T02	0	17	452	4414	9.8	4866	0.092	743	28	-4.7	No
T03	2	11	124	2451	19.8	2575	0.008	1046	28	-3.9	No
T04	0	9	317	3612	11.4	3929	0.026	900	28	-4.0	No
T05	0	13	211	1939	9.2	2150	0.019	939	28	-3.6	No
T06	0	58	305	3296	10.8	3601	0.175	664	15	-4.8	No
T07	0	34	240	2869	12.0	3109	0.144	688	28	-4.7	No
T08	0	16	582	3655	6.3	4237	0.05	819	28	-4.3	Yes
T09	0	17	327	1763	5.4	2090	0.022	921	28	-3.7	Yes
T10	0	2	320	2009	6.3	2329	0.01	1019	16	-3.4	Yes
T11	0	148	363	3378	9.3	3741	0.046	829	28	-4.3	No
T12	0	109	620	5742	9.3	6362	0.06	796	28	-4.6	No
T13	0	20	106	3702	34.9	3808	0.04	847	28	-4.2	No
T14	0	12	108	2591	24	2699	0.02	933	28	-3.7	No
T15	0	2	72	546	7.6	618	0.024	910	28	-3.2	No
T16	0	67	472	3478	7.4	3950	0.037	856	28	-4.2	Yes
T17	0	24	979	6240	6.4	7219	0.089	747	28	-4.8	Yes
T18	0	10	406	3074	7.6	3480	0.138	693	28	-4.7	No
T19	0	9	363	3333	9.2	3696	0.529	526	28	-5.3	No
T20	0	9	554	3763	6.8	4317	0.259	615	28	-5.0	Yes
T21	0	102	483	4073	8.4	4556	0.348	578	28	-5.2	No
T22	0	2	49	1390	28.4	1439	0.005	1105	16	-2.9	No
T23	0	2	53	1175	22.2	1228	0.006	1082	16	-2.9	No
T24	0	6	641	3779	5.9	4420	0.152	681	28	-4.8	Yes
T25	0	8	638	3466	5.4	4104	0.201	646	28	-4.9	Yes
T26	0	35	179	2487	13.9	2666	0.029	887	25	-3.9	No
T27	0	9	629	3954	6.3	4583	0.024	910	28	-4.0	Yes
T28	0	7	848	4060	4.8	4908	0.03	882	28	-4.2	Yes
T29	0	9	756	4036	5.3	4792	0.035	863	28	-4.2	Yes
T30	0	8	846	4055	4.8	4901	0.033	871	28	-4.2	Yes
T31	0	7	388	2642	6.8	3030	0.188	655	28	-4.8	Yes
T32	0	10	996	3863	3.9	4859	0.047	827	28	-4.4	Yes
T33	0	11	996	3567	3.6	4563	0.034	867	28	-4.2	Yes

Table 7 The CFAE index is in the normal range, but the CO₂/CO value exceeds the standards

TR	Ratio CO ₂ /CO	CFAE	Stebbins (DP value)	DBV (kV)	Acidity (mgKOH/g)	Color Number	IFT (mN/m)	Water (ppm)	%WaterPaper (%)
T03	19.8	-3.9	1046	79.5	0.062	0.5	33	7.72	0.5
T04	11.4	-4.0	900	62.8	0.209	1.5	26	10.6	0.8
T06	10.8	-4.8	664	75.2	0.108	2.5	20	19.71	1.3
T07	12.0	-4.7	688	66.9	0.111	1	27	17.68	1.2
T13	34.9	-4.2	847	63.6	0.182	3.5	31	15.26	1.2
T14	24.0	-3.7	933	68.5	0.174	3.5	31	11.39	0.9
T22	28.4	-2.9	1105	62.5	0.067	0.5	32	10.98	0.9
T23	22.2	-2.9	1082	65	0.016	0.5	36	10.48	0.8
T26	13.9	-3.9	887	72.6	0.12	1	28	27.2	2

Table 8 The CFAE index is relatively low but is still in the normal range while the CO₂/CO ratio is within the standard ranges

TR	Ratio CO ₂ /CO	CFAE	Stebbins (DP value)	DBV (kV)	Acidity (mgKOH/g)	Color Number	IFT (mN/m)	Water (ppm)	%WaterPaper (%)
T17	6.4	-4.8	747	28.3	0.202	3	18	49.48	3.1
T18	7.6	-4.7	693	44.2	0.23	2.5	18	31.31	2.2
T19	9.2	-5.3	526	50.2	0.176	2.5	18	77.32	5.5
T20	6.8	-5.0	615	73.9	0.329	2.5	13	35.11	2.8
T21	8.4	-5.2	578	42.4	0.169	3.5	20	46.32	2.6
T24	5.9	-4.8	681	45.8	0.243	3.5	17	66.18	5.5
T25	5.4	-4.9	646	24.3	0.24	3.5	16	68.13	5.7
T31	6.8	-4.8	655	71.2	0.22	2.5	19	37.62	3.1

Table 9 Standards for oil quality

Type of Test	Standard	Value
DBV (kV)	IEC60156 (gap 2.5 mm)	> 45
IFT (mN/m)	ASTM D971	≥ 25
Color Number	ASTM D1500	≤ 3.5
Acidity (mg KOH/g)	ASTM D664	≤ 0.2
Water (ppm)	ASTM D1533	≤ 30
%WaterPaper (%)	ASTM D1533	≤ 2

7. บทสรุป

ปริมาณ CO, CO₂, อัตรา CO₂/CO และปริมาณ 2FAL บ่งบอกการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนกระดาษได้ หากค่า 2FAL ภายในน้ำมันหม้อแปลงมีค่าสูง แสดงว่าเกิดการย่อยสลายหรือเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงของฉนวนกระดาษ แต่หาก 2FAL มีค่าต่ำก็ไม่ได้หมายความว่าไม่เกิดความเสียหายกับฉนวนกระดาษ และยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลให้เกิดก๊าซ CO และ CO₂ นอกเหนือจากการย่อยสลายฉนวนกระดาษจากทั้งหมดที่กล่าวมาจึงจำเป็นต้องทำการประเมินสภาพฉนวนกระดาษจากหลาย ๆ ปัจจัย

อัตราส่วนของ CO₂/CO มักถูกใช้ในการวินิจฉัยสถานะของการย่อยสลายเซลล์ในฉนวนกระดาษหม้อแปลง แต่การใช้ตัวบ่งชี้เพียงตัวเดียวในการวิเคราะห์อาจทำให้ได้ผลการประเมินสถานะของการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนกระดาษไม่ถูกต้องนัก งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการใช้ตัวบ่งชี้หลายตัวพร้อมกันในการประเมินสภาพฉนวนกระดาษ เหตุผลในการเลือกตัวบ่งชี้ CO, CO₂ และ 2FAL เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์หลักหลังจากเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลล์ของฉนวนกระดาษ นอกจากนี้เหตุผลในการเลือกใช้ก๊าซ C₂H₂ เพราะการเกิดก๊าซชนิดนี้จะเกิดในอุณหภูมิสูงหรือเกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลงในรูปแบบการเกิดอาร์ค ซึ่งจะเสียหายต่อฉนวนกระดาษ และเหตุผลที่เลือก C₂H₄ เกิดจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง C₂H₄ กับ DP ของฉนวนกระดาษมีค่าสูง จากการศึกษาทั้งสองกรณีจะเห็นได้ว่าการใช้ตัวบ่งชี้อัตราส่วน CO₂/CO ในการทำนายสถานะของการย่อยสลายฉนวนกระดาษในหม้อแปลงอาจไม่ถูกต้องนัก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ตัวบ่งชี้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงกำลังร่วมกันมากกว่า 1 ตัวบ่งชี้ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานบำรุงรักษาเกิดความมั่นใจมากยิ่งขึ้นกว่าการพิจารณาตัวบ่งชี้เพียงตัวเดียว ตัวอย่างเช่นหม้อแปลงกำลัง T06 T07 T19 T20 และ T21 ของโรงงานอุตสาหกรรม

ต้นแบบที่นำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์นั้นผลการวิเคราะห์พบว่าฉนวนเริ่มมีความเสื่อมสภาพ ต้องมีการเฝ้าระวังติดตามดูแลแนวโน้มผลการทดสอบของหม้อแปลงอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) และคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาที่ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลและทุนวิจัยทำให้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

9. References

- [1] Jahromi, A. and et al. 2009. An approach to power transformer asset management using health index. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 25(2): 20-34.
- [2] Ortiz, F. and et al. 2016. Health indexes for power transformers: A case study. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 32(5): 7-17.
- [3] Islam, M.M., Lee, G. and Hettiwatte, S.N. 2017. A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. **Electrical Engineering**. 100(2): 581-605.
- [4] Frimpong, G.K., Oommen, T.V. and Asano, R. 2011. A survey of aging characteristics of cellulose insulation in natural ester and mineral oil. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 27(5): 36-48.
- [5] Oommen, T. V. and Prevost, T. A. 2006. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part II maintaining insulation integrity and life. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 22(2): 5-14.
- [6] Prevost, T. A. and Oommen, T. V. 2006. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I - history and development. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 22(1): 28-35.
- [7] Sermukroongsakul, S. and et al. 2019. A study of remaining lifetime assessment of generator step-up transformer using degree of polymerization. In: **Proceedings of the 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)**, 19-23 March 2019. Bangkok, Thailand.
- [8] Singh, R. P. and et al. 2020. A review on traditional methods of condition monitoring of transformer. In: **Proceedings of the 2020 International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)**, 2-4 July 2020. Coimbatore, India.
- [9] Lelekakis, N., Martin, D. and Wijaya, J. 2012. Ageing rate of paper insulation used in power transformers Part 2: Oil/ paper system with medium and high oxygen concentration. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 19(6): 2009-2018.
- [10] Lelekakis, N., Martin, D. and Wijaya, J. 2012. Ageing rate of paper insulation used in power transformers Part 1: Oil/paper system with low oxygen concentration. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 19(6): 1999-2008.
- [11] Lelekakis, N. and et al. 2014. The effect of acid accumulation in power-transformer oil on the aging rate of paper insulation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 30(3): 19-26.
- [12] Kuen, C. 2010. Analysis and comparison of aging-trends of cellulose for transformers with oil-cellulose-insulation. In: **Proceedings of the 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application**, 11-14 October 2010. New Orleans, LA, USA.
- [13] Liland, K.B. and et al. 2011. Ageing of oil impregnated thermally upgraded papers. In: **Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids**, 26-30 June 2011. Trondheim, Norway.
- [14] Unsworth, J. and Mitchell, F. 1988. Degradation of electrical insulating paper monitored using high performance liquid chromatography. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**, 12-16 September 1988. Beijing, China.
- [15] Suwarno, R. and Pasaribu, R. 2017. Effects of thermal aging on paper characteristics in paper-mineral oil composite insulation. In: **Proceedings of the 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)**, 11-15 September 2017. Toyohashi, Japan.

- [16] Teymouri, A. and Vahidi, B. 2017. CO₂/ CO concentration ratio: A complementary method for determining the degree of polymerization of power transformer paper insulation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 33(1): 24-30.
- [17] Zhang, C. H. and Macalpine, J. M. K. 2006. Furfural concentration in transformer oil as an indicator of paper ageing, part 1: A review. In: **Proceedings of the 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition**, 29 October-1 November 2006. Atlanta, GA, USA.
- [18] Cheim, L. and et al. 2012. Furan analysis for liquid power transformers. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 28(2): 8-21.
- [19] Stebbins, R.D., Myers, D.S. and Shkolnik, A.B. 2003. Furanic compounds in dielectric liquid samples: Review and update of diagnostic interpretation and estimation of insulation ageing. In: **Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**, 1-5 June 2003. Nagoya, Japan.
- [20] Allan, D.M. 1992. A practical life assessment technique for aged oil paper systems. In: **Proceedings of the 6th International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications**, 7-10 September 1992. Manchester, UK.
- [21] Feng, D. and et al. 2019. Effect of oil-paper-pressboard mass ratio on furfural content in transformer oil. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 26(4): 1308-1315.
- [22] Pahlavanpour, B., Martins, M.A. and Pablo, A.D. 2002. Experimental investigation into the thermal-ageing of Kraft paper and mineral insulating oil. In: **Proceedings of the Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, 7-10 April 2002. Boston, MA, USA.
- [23] Teymouri, A. and Vahidi, B. 2021. Power transformer cellulosic insulation destruction assessment using a calculated index composed of CO, CO₂, 2-furfural, and acetylene. **Cellulose**. 28(1): 489-502.
- [24] IEEE. 2019. **IEEE Std C57.104-2019 IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers**. [https:// pdfcoffee.com/ ieee-c57104-2019pdf-5-pdf-free.html](https://pdfcoffee.com/ieee-c57104-2019pdf-5-pdf-free.html). Accessed 31 January 2021.
- [25] Prasajo, R.A. and et al. 2017. Correlation of transformer paper deterioration to oil characteristics and dissolved gases. In: **Proceedings of the 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)**, 2-5 October 2017. Dempasar, Indonesia.
- [26] Lee, S. and et al. 2013. New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases part 2: Application of relative content of fault gases. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 20(2): 691-696.