

การคำนวณหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายและ ระบุรูปแบบการเกิดความผิดปกติ

Health Index Calculation for Distribution Transformer and Fault Identification

โสภา แซ่เฮ้ง*

Sopa Sae-Heng*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม ประเทศไทย

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,

Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding author E-mail: sopa.hen@rmutr.ac.th, sopa_heng@hotmail.com

Received 16 May 2025; Revised 22 December 2025; Accepted 27 December 2025

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ : หม้อแปลงจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้า จึงต้องมีการบำรุงรักษาประจำปีอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุขัดข้องขึ้น ซึ่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไปนั้น จะมีหม้อแปลงระบบจำหน่ายติดตั้งอยู่เป็นจำนวนมาก หม้อแปลงแต่ละเครื่องมีสภาพแตกต่างกันตามอายุและลักษณะการใช้งาน หากสามารถแยกแยะสภาพของหม้อแปลงได้ จะช่วยให้สามารถจัดกิจกรรมและความถี่ของการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงจำหน่ายได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอวิธีหาค่าดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อใช้ประกอบการจัดทำแผนบำรุงรักษาหม้อแปลง

วิธีดำเนินการวิจัย : ประเมินค่าดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก และวิธีฟิชชิลอจิก ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินดัชนีสุขภาพของหม้อแปลง ได้แก่ ปริมาณแก๊สที่ละลายในน้ำมัน ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมัน ปริมาณน้ำในน้ำมัน และอายุการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่าย ประยุกต์ใช้ทั้ง 2 วิธีดังกล่าวกับผลการตรวจวัดสภาพของหม้อแปลงจำหน่าย จำนวน 23 เครื่อง นอกจากนี้ ยังได้ระบุรูปแบบการเกิดฟอลต์ภายในหม้อแปลงด้วยวิธีอัตราส่วนโออีซีโดยใช้ฟิชชิลอจิกด้วย

ผลการวิจัย : จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่าย พบว่า วิธีทั้ง 2 วิธีให้ผลระดับสภาพของหม้อแปลงตรงกัน 6 เครื่อง ส่วนที่เหลืออีก 17 เครื่อง ให้ผลแตกต่างกัน โดยมี 15 เครื่อง ที่ผลจากวิธีฟิชชิลอจิกได้ระดับสภาพแย่กว่าวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก 1 ระดับ และอีก 2 เครื่อง แย่กว่า 2 ระดับ วิธีฟิชชิลอจิกให้ผลระดับสุขภาพของหม้อแปลงที่เหมาะสมมากกว่าวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากวิธีค่าถ่วงน้ำหนักมีการกำหนดขอบเขตช่วงระดับคะแนนของแต่ละปัจจัยแบบตายตัว แต่วิธีฟิชชิลอจิกทำให้ขอบเขตดังกล่าวมีความยืดหยุ่นขึ้น

ซึ่งเหมาะสำหรับการประเมินร่วมกันของหลายข้อมูลโดยไม่ต้องพึ่งเกณฑ์ที่ชัดเจนแบบตายตัว ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดฟอลต์ พบว่า มีหม้อแปลงจำหน่ายจำนวน 5 เครื่องที่เกิดความผิดปกติขึ้นภายในหม้อแปลง

สรุป : การบำรุงรักษาหม้อแปลงจำหน่ายเป็นเรื่องจำเป็นยิ่ง หากสามารถวางแผนจัดการบำรุงรักษาหม้อแปลงตามสภาพของหม้อแปลงได้ จะช่วยลดปัญหาไฟฟ้าขัดข้อง เพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การประเมินค่าดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนักง่ายและสะดวกกว่าในแง่การประยุกต์ใช้งาน แต่มีข้อด้อยคือไม่สามารถแบ่งแยกระดับสภาพของหม้อแปลงที่มีความคลุมเครือของปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ประเมินสภาพได้ ในทางตรงกันข้าม วิธีฟัชชีลอจิกให้ผลที่ตรงกับสภาพของหม้อแปลงมากกว่า การวิเคราะห์รูปแบบการเกิดฟอลต์ด้วยอัตราส่วนไอซีซีร่วมกับฟัชชีลอจิกช่วยให้ระบุความผิดปกติที่เกิดภายในหม้อแปลงได้แม่นยำขึ้น ทำให้จัดกิจกรรมบำรุงรักษาหม้อแปลงได้อย่างเหมาะสม

การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ : ผลการประเมินดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายที่ได้สามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกกิจกรรมการบำรุงรักษาตามลำดับความวิกฤตหม้อแปลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย หรือสถานประกอบการที่มีการใช้หม้อแปลงจำหน่ายจำนวนมาก เพื่อช่วยลดระยะเวลา แรงงานที่ต้องใช้ในการบำรุงรักษา และเกิดการใช้จ่ายอย่างคุ้มค่า

คำสำคัญ : ดัชนีสุขภาพ, หม้อแปลงจำหน่าย, ค่าถ่วงน้ำหนัก, ฟัชชีลอจิก

Abstract

Background and Objectives: Distribution transformers are critical components in electrical power systems. Therefore, regular annual maintenance is essential to prevent operational failures. In typical distribution networks, a large number of transformers are installed, each exhibiting different conditions depending on age and operating environment. Identifying the condition of each transformer enables utilities to plan appropriate maintenance activities and frequencies, thereby reducing costs and improving operational performance. This research aimed to propose a method that can be used to determine the health index of distribution transformers to support the development of condition-based maintenance plans.

Methodology: The health index of distribution transformers was assessed by employing the weighted scoring method and the fuzzy logic method. The factors used for the assessment included dissolved gases in oil, breakdown voltage strength of the insulating oil, moisture content in oil, and transformer service age. Both methods were applied to the condition monitoring data obtained from 23 distribution transformers. Furthermore, patterns of internal transformer faults were identified by using the IEC gas ratio method integrated with fuzzy logic.

Main Results: The analysis of transformer health indices obtained from both methods reveals that consistent condition levels were produced for 6 transformers, while the remaining 17 units showed discrepancies. Among these, 15 transformers were classified by the fuzzy logic method as having worse health levels by one grade level compared with the weighted scoring method; 2 transformers were classified as worse by two grade levels. The fuzzy logic approach was found to provide more appropriate health-level classifications as the weighted scoring method relies on fixed boundary ranges for each factor, whereas fuzzy logic enables more flexible boundaries suitable for multi-factor evaluation without requiring rigid criteria. In addition, the fault pattern analysis indicates that internal faults occurred in five of the distribution transformers.

Conclusions: Regular maintenance of distribution transformers is crucial. Implementing condition-based maintenance plan can help reduce outages and enhance system reliability. While the weighted-score method is simpler and easier to implement, it is less effective in differentiating conditions when input factors are ambiguous. In contrast, fuzzy logic more accurately reflects real transformer conditions. Integrating the IEC gas ratio method with fuzzy logic enhances the accuracy of fault identification, enabling more effective maintenance planning.

Practical Application: The transformer health index results can support prioritization of maintenance activities based on transformer criticality, particularly for distribution utilities or facilities with a large number of transformers. This approach helps reduce maintenance time and labor requirements and promotes more cost-effective resource allocation.

Keywords: Health Index, Distribution Transformer, Weight Factor, Fuzzy Logic

Introduction

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกือบ 50% ของทั้งหมดเป็นค่าดำเนินการให้ระบบมีความเชื่อถือได้ [1] โดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ คือ ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้มีความเชื่อถือได้ ซึ่งจากการสำรวจสาเหตุไฟฟ้าดับส่วนใหญ่พบว่าเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ระบบจำหน่าย [2-5] หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากและเป็นสินทรัพย์ที่มีมูลค่าสูงเมื่อเทียบกับสินทรัพย์อื่น ๆ การขัดข้องของหม้อแปลงจะส่งผลกระทบโดยตรงทั้งกับภาคอุตสาหกรรม ธุรกิจ ผู้ใช้ไฟฟ้า และทั้งด้านความเชื่อถือได้ ความปลอดภัยต่อประชาชน และทรัพย์สินที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ดังนั้นการบำรุงรักษาที่สมเหตุสมผลไม่เพียงแต่จะช่วยให้ความเชื่อถือได้ดียิ่งขึ้นยังช่วยให้เกิดการใช้จ่ายที่คุ้มค่าอีกด้วย

การบำรุงรักษาหม้อแปลงจำหน่ายในปัจจุบันมักเป็นการบำรุงรักษาเชิงป้องกันตามวาระ (Time-directed preventive maintenance or routine preventive maintenance) โดยส่วนใหญ่จะทำปีละครั้ง ซึ่งแนวโน้มการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ กำลังเปลี่ยนแปลงจากการบำรุงรักษาตามวาระเป็นการบำรุงรักษาตามสภาพ (Condition-based maintenance) หรือจากการบำรุงรักษาตามกำหนดเวลา (Scheduled maintenance) เป็นการบำรุงรักษาเมื่อจำเป็น (Maintenance as needed) ซึ่งจะช่วยให้เกิดการใช้จ่ายอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีกระบวนการช่วยในการตัดสินใจเพื่อการจัดการทรัพย์สินที่เหมาะสม วิธีการหนึ่งที่ยอมรับ คือ การใช้ดัชนีสุขภาพ (Health index; HI) ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลสภาพโดยรวมของหม้อแปลงที่ได้จากทั้งประวัติการทำงานและข้อมูลการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาพ ดัชนีนี้ใช้บ่งบอกถึงความเชื่อถือได้ของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบสภาพหรือจัดอันดับการทำการกิจกรรมบำรุงรักษาหม้อแปลงได้

ปัจจุบัน การหาดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงมักจะทำกับหม้อแปลงกำลังซึ่งมีราคาสูงกว่าและมีการทดสอบตรวจวัดมากกว่า นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคโนโลยีการตรวจวัดแบบ Real time ที่มีความซับซ้อนและราคาสูงร่วมด้วย ส่วนหม้อแปลงจำหน่ายแม้จะมีความสำคัญน้อยกว่าแต่ด้วยจำนวนที่มีมากกว่ามาก ซึ่งหากเกิดขัดข้องขึ้นก็จะส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวมได้มาก ปกติแล้วการบำรุงรักษาประจำปีของหม้อแปลงจำหน่ายนั้น จะทำเพียงการตรวจสภาพความผิดปกติภายนอก ดูการรั่วซึมของน้ำ วัดค่าความต้านทานของขดลวด ทดสอบค่าความคงทนฉนวนของน้ำมัน โดยไม่ได้ทำการทดสอบวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved gas analysis; DGA) หรือไม่มีการตรวจวัดคุณภาพน้ำมันโดยละเอียด เช่น วัดค่าความชื้น ความตึงผิว ความเป็นกรดต่าง เป็นต้น เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้หากมีการทดสอบวิเคราะห์ DGA รวมถึงการทดสอบคุณภาพน้ำมันของหม้อแปลงจำหน่าย ก็จะช่วยทำให้สามารถระบุรูปแบบของฟอลต์ที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงและนำมาใช้ประเมินผลดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ทำให้สามารถทำการแก้ไขได้ทันก่อนที่จะเป็นเหตุทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนที่อยู่บริเวณใกล้เคียง

โดยทั่วไป การหาดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงนิยมที่จะแบ่งปัจจัยที่ใช้ประเมินสภาพของ หม้อแปลงออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน หม้อแปลง (DGA) ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำมัน (Oil quality) และปัจจัยที่ได้จากการตรวจวัดทางไฟฟ้า (Electrical test) การใช้ตัวเลขดัชนีแทนสภาพหม้อแปลงเป็นการแทนสภาพโดยรวมของหม้อแปลงจากทุกปัจจัยดังกล่าว ในบางกรณี เช่น ปัจจัย DGA ที่นำผลรวมปริมาณแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของมาตรฐานต่าง ๆ แต่หากปริมาณแก๊สบางชนิดเกิดขึ้นมากผิดปกติในขณะที่บางแก๊สเกิดเพียงเล็กน้อยจะทำให้ปัจจัย DGA ส่งผลต่อค่าดัชนีสุขภาพหม้อแปลงไม่มาก ดังนั้นหากพิจารณาดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงร่วมกับการแปลผลแก๊สที่เกิดขึ้นเพื่อหารูปแบบการเกิดฟอลต์ด้วย จะช่วยให้ได้ผลการประเมินสภาพหม้อแปลงมีความแม่นยำมากขึ้น จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงมักทำกับหม้อแปลงกำลัง ซึ่งยังไม่มีมีการประยุกต์กับหม้อแปลงระบบจำหน่าย งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการคำนวณหาดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายที่มีการพิจารณาลักษณะของความผิดปกติพร้อมด้วยโดยได้ทำการศึกษาทั้งวิธีคำนวณน้ำหนักและวิธีฟิชชิลอจิก และทำการทดสอบวิธีการที่เสนอกับข้อมูลการตรวจวัดหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้งาน

ในสภาวะจริง ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจวางแผนการทำการกิจกรรมบำรุงรักษาหม้อแปลงจำหน่ายได้อย่างเหมาะสมกับสภาพความเป็นจริง และช่วยลดการบำรุงรักษาที่ไม่จำเป็นสำหรับหม้อแปลงที่มีสุขภาพดี ช่วยให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และช่วยให้ความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวมดีขึ้น

Methodology

ดัชนีสุขภาพ (Health index) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจัดการสินทรัพย์เพื่อการจัดลำดับความสำคัญของการลงทุนและการบำรุงรักษา ด้วยการรวมเอาปัจจัยสภาพต่าง ๆ ที่สามารถสื่อถึงสภาพของอุปกรณ์ได้ ทั้งปัจจัยที่ได้จากการตรวจวัด ผลการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ และประวัติการใช้งาน วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ วิธีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight factor) ซึ่งวิธีนี้จะทำการให้คะแนนแต่ละปัจจัยตามสภาพและให้น้ำหนักตามความสำคัญของปัจจัยนั้น ๆ จากนั้นหาผลคูณของคะแนนและน้ำหนักเหล่านี้และรวมออกมาเป็นตัวเลขค่าหนึ่งที่เราเรียกว่าดัชนีสุขภาพ ซึ่งใช้แทนสภาพโดยรวมของอุปกรณ์ตัวนั้น นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นอีก ได้แก่ วิธี Fuzzy logic, Bayesian networks และ Artificial neural networks งานวิจัยนี้เสนอวิธีหาค่าดัชนีสุขภาพด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก และวิธีฟัซซีลอจิก ร่วมกับการวิเคราะห์รูปแบบการเกิดฟอลต์ด้วย IEC ratio โดยใช้ฟัซซีลอจิก รายละเอียดดังต่อไปนี้

การประเมินดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก

การประเมินสภาพหม้อแปลงด้วยวิธีนี้ส่วนมากอิงตามมาตรฐาน ASTM, IEC, IEEE และคำแนะนำของ CIGRE วิธีค่าถ่วงน้ำหนักจะกำหนดน้ำหนัก (Weight) และคะแนน (Score) ให้กับปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสภาพหม้อแปลง เช่น ใน [6] ใช้ 24 ปัจจัย ส่วน [7] ใช้ 20 ปัจจัย ซึ่งแบ่งเป็นปัจจัยภายในตัวถังหม้อแปลง (Main tank) และปัจจัยของ Tap changer และหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงตามสมการที่ (1)

$$HI = 60\% \frac{\sum_{j=1}^{MT} K_j \times HIF_j}{\sum_{j=1}^{21} 4K_j} + 40\% \frac{\sum_{j=22}^{LTC} K_j \times HIF_j}{\sum_{j=22}^{24} 4K_j} \quad (1)$$

เมื่อ	K	= น้ำหนักของปัจจัยสภาพ
	HIF	= คะแนนของปัจจัยสภาพ
	MT	= ปัจจัยที่เกี่ยวกับ Main tank
	LTC	= ปัจจัยที่เกี่ยวกับ Load tap changer

จากนั้น กำหนดน้ำหนัก (Weight) และคะแนน (Score) ดังตัวอย่างใน Table 1 [8]

Table 1 Diagnostic measurements, weights, and condition ratings which are used as input data for the health index [8]

No.	Measurement	Weight (W_i)	Condition rating (CR_i)
1	Gas analysis	10	4,3,2,1,0
2	Oil analysis	6	4,3,2,1,0
3	Loading	10	4,3,2,1,0
4	Age	5	4,3,2,1,0

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายโดยกำหนดปัจจัยการประเมินสภาพจากข้อมูลที่มีการตรวจวัดจริงเพื่อการบำรุงรักษาหม้อแปลงจำหน่ายของสถานประกอบการแห่งหนึ่งจำนวน 23 เครื่อง ได้แก่ DGA, Oil quality และอายุการใช้งาน ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยมีความสำคัญในการบ่งบอกสภาพของหม้อแปลงดังนี้

DGA ซึ่งใช้บ่งบอกถึงการเกิดความผิดปกติภายใน (Internal fault) เช่น การอาร์ก ดีสชาร์จบางส่วน การ Spark ที่มีพลังงานต่ำ การจ่ายโหลดเกิน ความร้อนเกินภายในระบบฉนวน จะทำให้น้ำมันและฉนวนกระดาษเกิดการสลายตัวและปล่อยแก๊สบางชนิดออกมา

Oil quality ใช้บ่งบอกความสามารถในการเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงและกระดาษฉนวน ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมัน (Breakdown voltage; BDV) และปริมาณน้ำในน้ำมันหม้อแปลง

อายุการใช้งานของหม้อแปลง ใช้บ่งบอกอายุของฉนวน ความน่าเชื่อถือ และอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่เหลืออยู่

ในอนาคตหากมีการตรวจวัดข้อมูลอื่น ๆ เพิ่มเติม ก็สามารถเพิ่มปัจจัยเหล่านั้นในการประมวลผลของฟัซซีลอจิกได้ ซึ่งจะช่วยให้ผลดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายมีความแม่นยำมากขึ้น การกำหนดน้ำหนักและคะแนนของปัจจัยดังกล่าวอ้างอิงเกณฑ์น้ำหนักปัจจัยตาม [8-9] รายละเอียดดัง Table 2

Table 2 Factors and weights which are used as input data for the HI

Factor	Weight (%) from Ref. [8]			Weight (%) from Ref. [9]			Weight (%)
Gas analysis	10	47.62	≈ 50	26.15	61.54	≈ 60	55
Oil analysis	6	28.57	≈ 30	12.28	28.83	≈ 30	30
Age	5	23.81	≈ 20	4.06	9.56	≈ 10	15

ส่วนเกณฑ์คะแนนของปัจจัยที่ใช้ประเมินแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่

1. ปัจจัยแก๊สที่ละลายในน้ำมัน จะใช้ %DGAF ตามสมการที่ (2) โดยใช้เกณฑ์คะแนนและน้ำหนักตาม Table 3 [7, 9]

$$\%DGAF = \frac{\sum_{G=1}^7 (S_G \times W_G)}{6 \times \sum_{G=1}^7 W_G} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ DGAF = DGA factor
 S = คะแนนปัจจัยสภาพ
 W = น้ำหนักปัจจัยสภาพ
 G = ดัชนีแก๊ส H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO และ CO₂

Table 3 Scoring criteria and weights of dissolved gas in transformer oil [7, 9]

No.	Gas (ppm)	Score (S _i)						Weight (W _i)
		6	5	4	3	2	1	
1	H ₂	≤ 100	101-200	201-300	301-500	501-700	>700	3
2	CH ₄	≤ 75	76-125	126-200	201-400	401-600	> 600	2
3	C ₂ H ₆	≤ 65	66-80	81-100	101-120	121-150	> 150	2
4	C ₂ H ₄	≤ 50	51-80	81-100	101-150	151-200	> 200	2
5	C ₂ H ₂	≤ 3	4-7	8-35	36-50	51-80	> 80	1
6	CO	≤ 350	351-700	701-900	901-1100	1100-1400	> 1400	5
7	CO ₂	≤ 2500	≤ 3000	≤ 4000	≤ 5000	≤ 7000	> 7000	5

2. ปัจจัย Oil quality จะใช้ผลทดสอบ BDV และปริมาณน้ำในน้ำมันหม้อแปลง (Water content หน่วย ppm) [6, 7, 9] สำหรับเกณฑ์คะแนนและน้ำหนักของ BDV ใช้ตาม [10] แต่ปรับคะแนนเป็น 0-4 แทน 1-5 ดัง Table 4

Table 4 Scoring criteria for dielectric breakdown [10]

Dielectric Breakdown (kV)	Condition	Score
BDV > 40	Very Good	4
$35 \leq \text{BDV} \leq 40$	Good	3
$30 \leq \text{BDV} < 35$	Moderate	2
$25 \leq \text{BDV} < 30$	Poor	1
BDV < 25	Very Poor	0

ส่วนปริมาณน้ำในน้ำมันในหม้อแปลงตาม ASTM D1533 [11] กำหนดให้แรงดันไม่เกิน 69 kV ต้องมีปริมาณน้ำในน้ำมัน ≤ 35 ppm ส่วน IEEE 62-1995 [12] ได้กำหนดสภาพฉนวนเป็นเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวตัวสัมพัทธ์ (%RS; percent relative saturation) ของน้ำในฉนวนน้ำมันและฉนวนกระดาษ (%RS = [mg/kg water in oil]/[mg/kg of water in oil at saturation] $\times 100$ เมื่อ mg/kg = ppm) ซึ่งผลการตรวจวัดของสถานประกอบการเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 62-1995 โดยใช้วิธี Karl Fischer titration ในการตรวจวัด งานวิจัยนี้จึงเสนอ Water content factor ในการแทนปัจจัยของปริมาณน้ำในน้ำมันหม้อแปลงดังสมการที่ (3) โดยกำหนดเกณฑ์คะแนนและน้ำหนักดัง Table 5

$$WC_{Factor} = \frac{\sum_{i=1}^2 (S_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^2 W_i} \quad (3)$$

- เมื่อ
- WC_{Factor} = Water content factor
 - S_i = คะแนนของเปอร์เซ็นต์น้ำในน้ำมันหม้อแปลงและเปอร์เซ็นต์น้ำในฉนวนกระดาษ
 - W_i = น้ำหนักของปริมาณน้ำในน้ำมันและน้ำในฉนวนกระดาษ
 - i = ดัชนีฉนวน ($i=1$ คือ น้ำมัน และ $i=2$ คือ ฉนวนกระดาษ)

Table 5 Scoring criteria for %water saturation of oil and %moisture by dry weight in paper

% Water Saturation of Oil	Condition	Score	Weight
0 – 5 %	Dry Insulation	4	1
6 – 20 %	Moderate Wet	3	
21 – 30 %	Wet	2	
> 30 %	Extremely Wet	1	
% Moisture by Dry Weight in Paper	Condition	Score	Weight
0 – 2 %	Dry Paper	4	1
2 – 4 %	Wet Paper	2	
> 4 %	Extremely Wet Paper	0	

จากนั้น สร้างเกณฑ์คะแนนและน้ำหนักของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงระบบจำหน่ายขึ้นมาใหม่โดยดัดแปลงจากบทความ [6-7, 9] เป็น Table 6 เพื่อใช้คำนวณ %MOQF (% Main oil quality factor) ตามสมการที่ (4) [9]

Table 6 Scoring criteria and weighting of distribution transformer oil quality

No.	Diagnostic test		Condition	Score (S _Q)	Weight (W _Q)
1	Dielectric Breakdown (kV)	BDV > 40	Very Good	4	3
		35 ≤ BDV ≤ 40	Good	3	
		30 ≤ BDV < 35	Moderate	2	
		25 ≤ BDV < 30	Poor	1	
		BDV < 25	Very Poor	0	
2	Water content factor; WC _{Factor}	$WC_{Factor} = \frac{\sum_{i=1}^2 (S_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^2 W_i}$	Very Good	4	4
			Good	3	
			Moderate	2	
			Poor	1	
			Very Poor	0	

$$\%MOQF = \frac{\sum_{Q=1}^2 (S_Q \times W_Q)}{4 \times \sum_{Q=1}^2 W_Q} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ $\%MOQF$ = %Main oil quality factor

Z_Q = ค่าคะแนน

W_Q = ค่าน้ำหนัก

โดย $\%MOQF$ ที่ได้จะบ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลง และกำหนดค่าคะแนนของ $\%MOQF$ ที่ได้ตาม Table 7

Table 7 Scoring levels of %Main oil quality factor [9]

Scoring levels	Condition	Score
$\%MOQF < 30$	Very Good	4
$30 \leq \%MOQF < 37.5$	Good	3
$37.5 \leq \%MOQF < 50$	Moderate	2
$50 \leq \%MOQF < 75$	Poor	1
$\%MOQF \geq 75$	Very Poor	0

3. ปัจจัยอายุการใช้งานหม้อแปลง สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ปัจจัยนี้บ่งบอกอายุของฉนวน นอกจากนี้อายุฉนวนยังขึ้นอยู่กับ Thermal aging จาก Hot-spot temperature และ Overload cycles (มาตรฐาน IEEE C57.91) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มักมีการเก็บสำหรับหม้อแปลงกำลัง ส่วนหม้อแปลงจำหน่ายมักไม่มีการเก็บด้วยข้อจำกัดด้านงบประมาณ และจากการศึกษาข้อมูลของสถานประกอบการพบว่าไม่มีการเก็บข้อมูลเหล่านี้ งานวิจัยนี้จึงใช้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเพียงอย่างเดียว โดยเกณฑ์คะแนนของปัจจัยอายุการใช้งานหม้อแปลงของงานวิจัยนี้จะดัดแปลงจาก [10] ที่ได้ทำการศึกษาดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก โดยเปลี่ยนเกณฑ์คะแนนจาก 1-5 เป็น 0-4 ดัง Table 8

Table 8 Modified scoring criteria for distribution transformers age

Age (Year)	Condition	Score
Age < 5	Very Good	4
$5 \leq \text{Age} < 10$	Good	3
$10 \leq \text{Age} < 15$	Moderate	2
$15 \leq \text{Age} \leq 20$	Poor	1
Age > 20	Very Poor	0

จากปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยแก๊สที่ละลายในน้ำมัน ปัจจัยคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง และปัจจัยอายุการใช้งานของหม้อแปลง โดยให้น้ำหนักแต่ละปัจจัยตาม Table 2 จากนั้นทำการคำนวณดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนักตามขั้นตอนใน Figure 1 และสมการที่ (5)

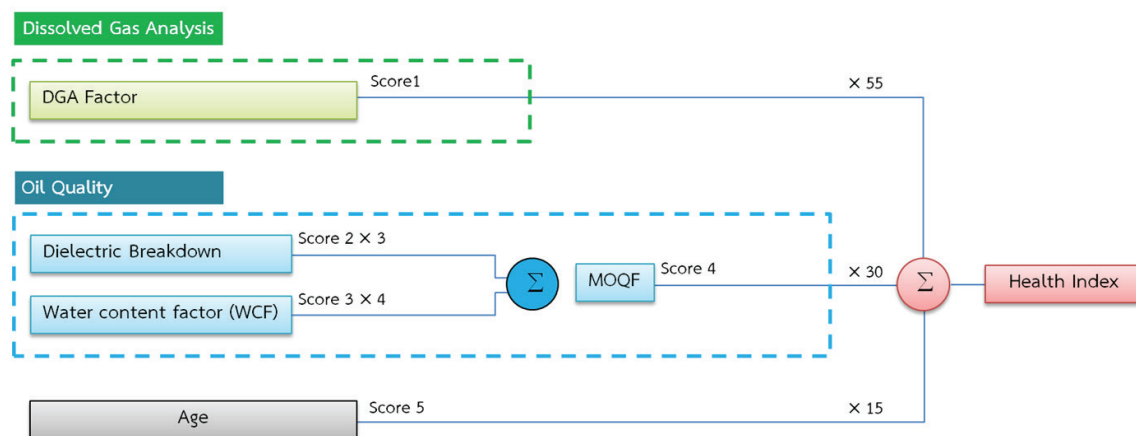


Figure 1 Procedure for calculating health Index of distribution transformers using the weight factor method

$$HI_{Total} = \frac{\sum_{j=1}^3 (S_j \times W_j)}{4 \times \sum_{j=1}^3 W_j} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ S_i = ค่าคะแนนปัจจัยการวิเคราะห์แก๊สที่ละลายในน้ำมัน (DGAF) คุณภาพน้ำมัน (MOQF) และอายุการใช้งานหม้อแปลง (Age)

W_i = ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัย DGAF, MOQF และ Age

โดยเกณฑ์การแบ่งสภาพของหม้อแปลงจำหน่ายและคำแนะนำในการบำรุงรักษาจะใช้เกณฑ์ ดังแสดงใน Table 9 [6-7, 9, 11]

Table 9 Criteria for distribution transformer health index and maintenance recommendation using the weight factor method [6-7]

HI	Condition	Expected Lifetime	Maintenance recommendation
0.85-1.00	Very Good	More than 15 years	Perform routine maintenance
0.70-0.85	Good	More than 10 years	Recheck within 6 months
0.50-0.70	Moderate	From 3 - 10 years	Plan corrective actions within 3 months
0.30-0.50	Poor	Less than 3 years	Plan corrective actions within 1 months
0.00-0.30	Very Poor	Near to the end of life	Take immediate corrective action

การประเมินดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีฟัซซี่ลอจิก

การประเมินดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีฟัซซี่ลอจิก เริ่มจากการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงที่ได้จากการทบทวนงานวิจัย และสอบถามความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญด้านการบำรุงรักษาหม้อแปลงระบบจำหน่ายเพื่อกำหนดกฎฟัซซี่ (Fuzzy rule) รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของปัจจัยที่ใช้หาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่าย ประกอบด้วย ผลรวมแก๊สที่สามารถติดไฟได้ (Total dissolved combustible gases; TDCG) ความคงทนของน้ำมันหม้อแปลงต่อแรงดันไฟฟ้า (BDV) ปริมาณน้ำในฉนวนน้ำมัน (WC) และอายุการใช้งานของหม้อแปลง โดยกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของทั้ง 4 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ TDCG ตาม IEEE C57.104 (2008) จะใช้แก๊ส 6 ชนิด คือ H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 และ CO โดยไม่รวม CO_2 ไม่ใช่ตัวชี้วัดเฉพาะเจาะจงของความผิดปกติในหม้อแปลง (อยู่ในกลุ่ม Non-fault gases) ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของ Cellulose ของกระดาษฉนวนที่เกิดขึ้นเป็นปกติตามอายุฉนวน การนับรวมจะทำให้ค่าดัชนีสุขภาพไม่แม่นยำ เพราะค่า CO_2 ที่สูงโดยธรรมชาติจะส่งผลให้แนวโน้มการเกิดแก๊สโดยรวมผิดปกติจากค่าที่แท้จริง โดยหม้อแปลงที่ระดับแรงดันไม่เกิน 69 kV ตามมาตรฐาน ASTM D3612 [11] เป็นไปตาม Figure 2

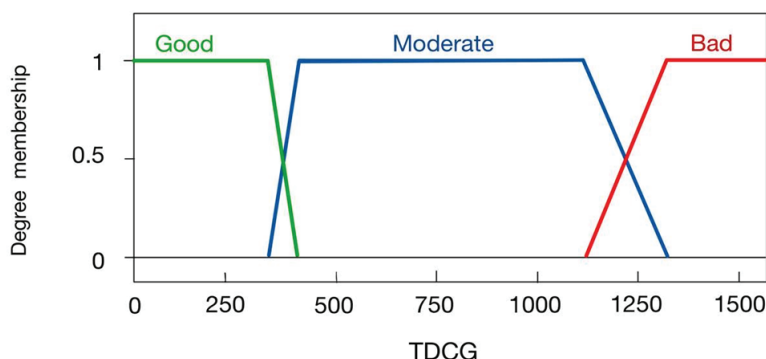


Figure 2 TDCG membership function for transformers up to 69 kV [11]

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ BDV ในมาตรฐาน ASTM D1816 [12] แสดงเกณฑ์การทดสอบ Breakdown voltage ตาม Table 10 ซึ่งทดสอบที่ระยะ Gap 1 mm และ 2 mm และ Figure 3 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิก BDV ที่ระยะ Gap 1 mm [11, 13-14] แต่เนื่องจากข้อมูลการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายของงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60156 ที่ระยะ Gap 2.5 mm ซึ่งตรงกับงานวิจัย [15] โดย [15] ได้กำหนดเกณฑ์สภาพน้ำมันหม้อแปลงไว้ 4 สภาวะ (Normal, Caution, Alarm และ Failure) ตามมาตรฐาน IEC 60156 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เกณฑ์ตามมาตรฐาน IEC 60156 ในการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ BDV โดยให้ค่า BDV ตั้งแต่ 50 kV ขึ้นไปอยู่ในเกณฑ์ดี ระหว่าง 30 kV ถึง 50 kV อยู่ในเกณฑ์ระดับกลาง และต่ำกว่า 30 kV อยู่ในเกณฑ์ที่แย่ ดัง Figure 4

Table 10 Breakdown voltage test criteria according to ASTM D1816 Standard [12]

Test and method	Value for voltage class (kV)		
	≤69	>69 - <230	≥230
New equipment			
Dielectric breakdown voltage			
ASTM D1816 [kV] minimum			
1 mm gap	25	30	35
2 mm gap	45	55	60
In-service mineral oil			
Dielectric breakdown voltage			
ASTM D1816 [kV] minimum			
1 mm gap	23	28	30
2 mm gap	40	47	50

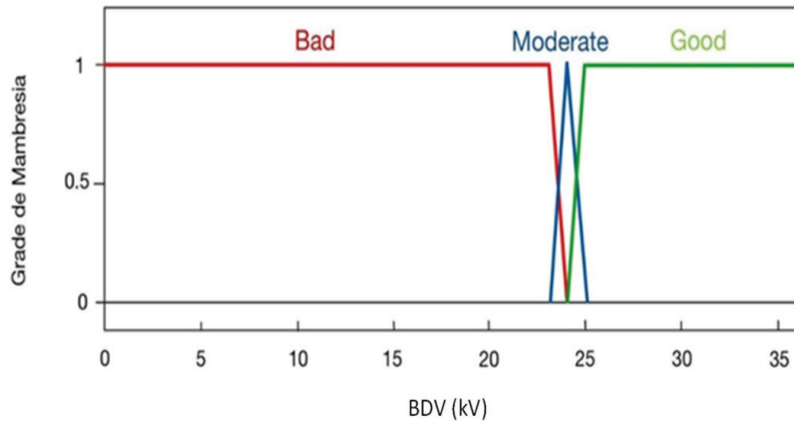


Figure 3 Fuzzy membership function for dielectric breakdown voltage [11, 13-14]

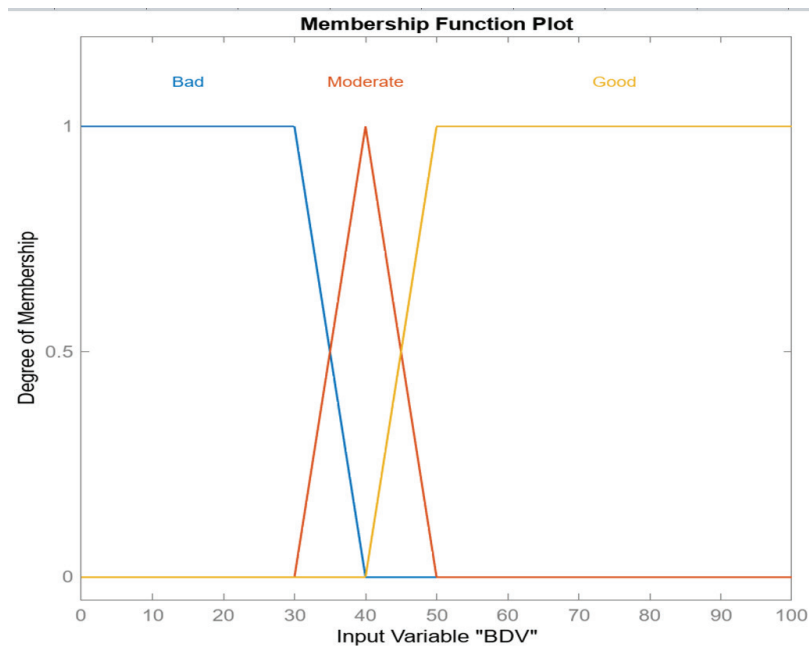
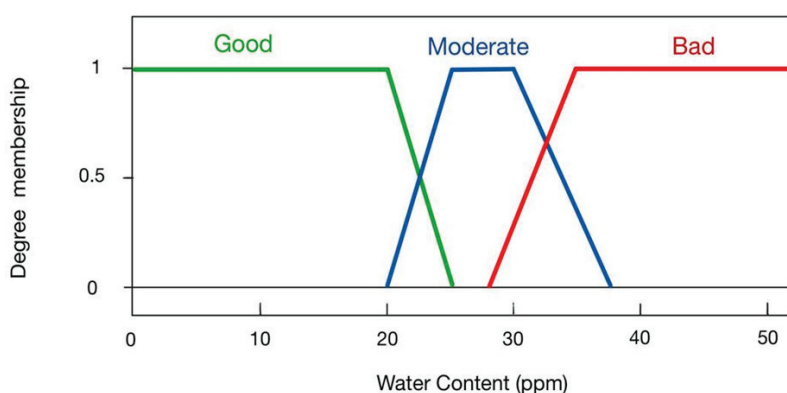


Figure 4 Proposed fuzzy membership function for dielectric breakdown voltage

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณน้ำในฉนวนน้ำมัน (Water in insulating liquid) เกณฑ์ปริมาณน้ำในฉนวนน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D1533 สำหรับแรงดันไม่เกิน 69 kV ได้กำหนดไว้ 2 เกณฑ์ คือ น้ำมันใหม่กำหนดให้มีปริมาณน้ำสูงสุดไม่เกิน 20 ppm และน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้งานแล้วกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 35 ppm ดัง Table 11 [12] และใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกปริมาณน้ำในฉนวนน้ำมันดัง Figure 5 [11, 13-14]

Table 11 Water content criteria in insulating oil according to ASTM D1533 Standard [12]

Test and method	Value for voltage class (kV)		
	≤69	>69 - <230	≥230
New equipment Water content ASTM D1533 mg/kg maximum (ppm)	20	10	10
In-service mineral oil Water content ASTM D1533 mg/kg maximum (ppm)	35	25	20

**Figure 5** Fuzzy membership function for water content in transformers rated up to 69 kV [11, 13-14]

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอายุหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer age) ประสิทธิภาพของหม้อแปลงจะลดลงตามอายุการใช้งาน โดยทั่วไป ฉนวนของหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมันจะมีช่วงอายุการใช้งานประมาณ 25-30 ปี ซึ่งหม้อแปลงที่มีอายุมากจะมีความเสี่ยงที่จะเกิดการขัดข้องขึ้นได้ง่าย งานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอายุหม้อแปลงตาม [16] ที่ได้ทำการศึกษาการประเมินความเสี่ยงของหม้อแปลงและสายส่งในระบบจำหน่ายด้วยวิธีฟัซซี่ลอจิก ดังแสดงใน Table 12 และ Figure 6

Table 12 Criteria for transformers age [16]

Young	Middle-aged	Old
0-10 years	5-25 years	20-35 years

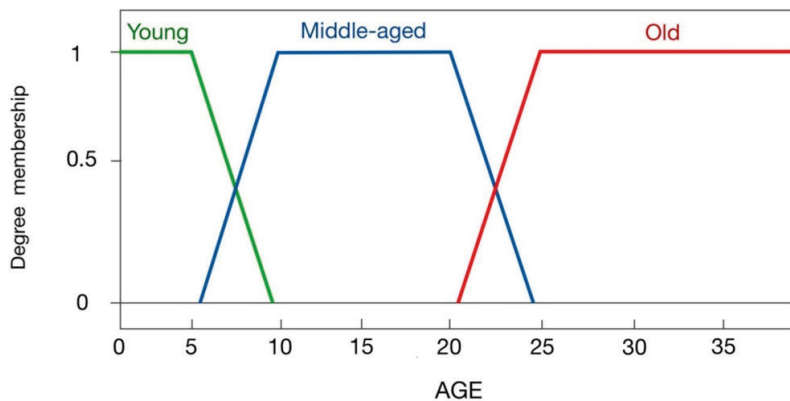


Figure 6 Fuzzy membership function for transformers age [16]

การประเมินความเสื่อมของหม้อแปลงโดยรวมจากอายุหม้อแปลงของวิธี Fuzzy logic ตาม Table 12 มีหลักการต่างจากวิธี Weight score ใน Table 8 วิธี Weight score ใช้อายุเป็นปัจจัยเชิงจัดกลุ่มโดยแปลงเป็นคะแนนแบบไม่ต่อเนื่องหรือขั้นบันไดเพื่อสะท้อนระดับความเสื่อมของหม้อแปลง ขณะที่วิธี Fuzzy logic กำหนดอายุเป็นตัวแปรเชิงภาษาศาสตร์และประมวลผลผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ไม่ได้กำหนดเป็นคะแนนแบบตายตัว ทำให้สามารถสะท้อนการเสื่อมของหม้อแปลงได้อย่างต่อเนื่อง การให้คะแนนอายุหม้อแปลงตาม Table 8 จึงมีการแบ่งช่วงอายุหม้อแปลงเป็นหลายระดับกว่าวิธี Fuzzy logic เพื่อไม่ให้เกิดกรณีที่อายุหม้อแปลงต่างกันมากได้คะแนนสภาพเท่ากัน เช่น ช่วงอายุ 5-25 ปี จะแบ่งออกได้เป็น 4 ระดับคะแนน (3, 2, 1, 0) และประเมินสภาพได้ Good, Moderate, Poor และ Very poor ส่วนวิธี Fuzzy logic ทำการกำหนดสภาพพจนานจากอายุหม้อแปลงเป็นชุดภาษาศาสตร์ ได้แก่ Young, Middle-age และ Old ตาม Table 12 โดยอายุหม้อแปลงเครื่องหนึ่งอาจมีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่า 1 ระดับ เช่น หม้อแปลงอายุ 8 ปี มีระดับความเป็นสมาชิกของ $\mu_{\text{Young}} = 0.4$ และ $\mu_{\text{Moderate}} = 0.6$ หมายความว่า หม้อแปลงอายุ 8 ปี ไม่ใช่ “Young” หรือ “Middle-aged” แบบตัดขาดจากกัน แต่มีลักษณะเป็น Moderate มากกว่า ($\mu=0.6$) ขณะที่ยังคงความเป็น Young อยู่บางส่วน ($\mu=0.4$) ซึ่งสะท้อนการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป และใช้ Membership function ของอายุหม้อแปลงที่สร้างจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ เอกสารอ้างอิงและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการแทนความสัมพันธ์ โดยใน Figure 7 แสดงการระบุระดับการเสื่อมของหม้อแปลงด้วยอายุหม้อแปลงของวิธี Weight score และ Fuzzy logic ตาม Table 8 และ Table 12 ตามลำดับ

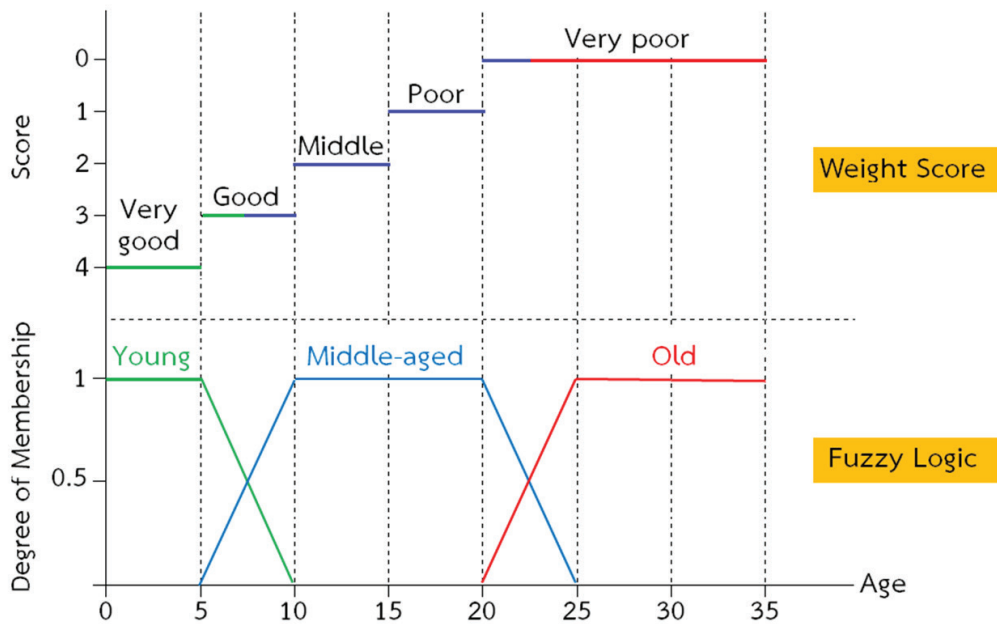


Figure 7 Comparison of transformer aging assessment based on Weight score and Fuzzy logic methods

2. การสร้างกฎฟัซซีในการหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อใช้ในกระบวนการตีความหาค่าดัชนีสุขภาพ งานวิจัยนี้ทำการสร้างกฎฟัซซีจากการทบทวนงานวิจัย [11, 13-14] ร่วมกับจัดทำแบบสอบถามความคิดเห็นจากผู้ที่มีประสบการณ์และเชี่ยวชาญด้านการบำรุงรักษาหม้อแปลงระบบจำหน่ายทั้งบุคลากรของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายและสายวิชาการ ผลจากแบบสอบถามให้น้ำหนักความสำคัญของปัจจัย TDCG มากที่สุด รองลงมาคือ WC, BDV และอายุการใช้งานหม้อแปลง (Age) ตามลำดับ สามารถสร้างเป็นกฎฟัซซีได้ทั้งหมด 19 กฎ แสดงดัง Table 13

Table 13 Fuzzy logic rules for assessing the health index of distribution transformers Rule

Rule No.	TDCG			WC			BDV			Age			HI Result
	Good	Moderate	Bad	Good	Moderate	Bad	Good	Moderate	Bad	Young	Middle	Old	
1			x			x							VB
2			x		x		x					x	M
3			x		x			x					B
4			x		x		x				x		M
5			x	x				x					B
6			x	x			x						M
7		x				x			x				B
8		x				x		x				x	B
9		x				x		x			x		M
10		x				x	x						M
11		x			x								M
12		x		x					x				M
13		x		x			x						G
14	x					x							M
15	x				x				x				M
16	x				x			x					G
17	x			x					x				M
18	x			x				x					G
19	x			x			x						VG

Note: VG = Very good G = Good M = Moderate B = Bad VB = Very bad

3. การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีสุขภาพหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้านเอาต์พุตงานวิจัยนี้แบ่งดัชนีสุขภาพออกเป็น 5 ระดับ ด้วย 4 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู จากบทความ [11, 13] ได้กำหนด

ให้ดัชนีสุขภาพค่าน้อยแทนสภาพหม้อแปลงที่ดีส่วนค่ามากแทนสภาพแย่ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับให้ดัชนีสุขภาพค่าที่สูงแทนสภาพของหม้อแปลงที่ดีและค่าน้อยแทนสภาพแย่ดัง Figure 8 เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลกับการประเมินดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนั้นจะได้เกณฑ์ค่าคะแนนดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่าย ดังต่อไปนี้

Very good	มีคะแนน	≥ 0.75
Good	มีคะแนน	0.6 – 0.8
Moderate	มีคะแนน	0.3 – 0.65
Poor	มีคะแนน	0.1 - 0.35
Very Poor	มีคะแนน	≤ 0.15

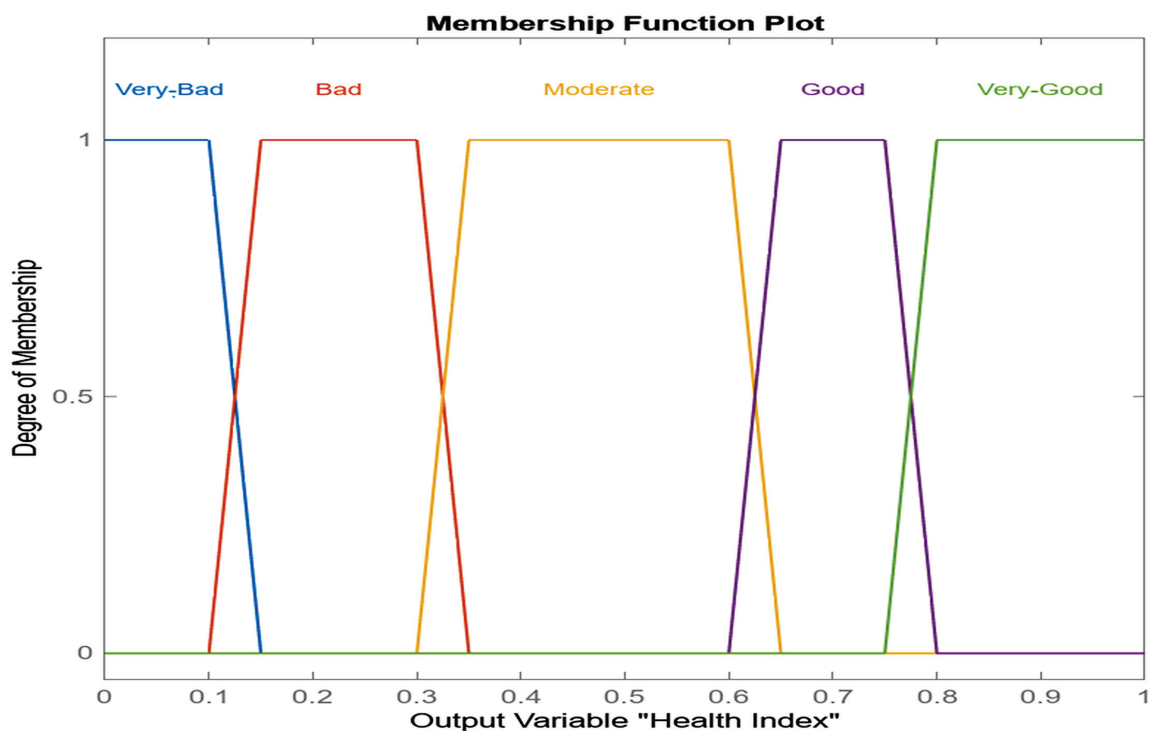


Figure 8 Fuzzy membership function for the output of the health index of distribution transformers

4. การหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายด้วยฟัซซีลอจิก หลังจากกำหนดปัจจัยในการประเมินดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่าย สร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับแต่ละปัจจัย สร้างกฎฟัซซี และสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีสุขภาพแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายด้วยฟัซซีลอจิกโดยใช้รูปแบบของ Mamdani ด้วยโปรแกรม MATLAB

การวิเคราะห์ความผิดปกติของน้ำมันหม้อแปลงจำหน่ายด้วยฟuzzyลอจิก

โดยทั่วไป การวิเคราะห์ความผิดปกติของน้ำมันหม้อแปลงด้วยข้อมูล DGA มักใช้หลายวิธีร่วมกันมากกว่าการใช้เพียงวิธีเดียว [17] เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ เนื่องจากแต่ละวิธีมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน วิธี IEC gas ratio ให้ผลการวิเคราะห์ความผิดปกติที่มีความแม่นยำสูงกว่าวิธี Rogers ratio [18] และเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและใช้อย่างแพร่หลาย [18–20] ขณะที่วิธี Doernenburg ratio ให้ความแม่นยำต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น แม้ว่าวิธี Duval Triangle จะได้รับการยอมรับว่ามีความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ในแผนภาพ Duval Triangle ไม่มีการกำหนดโซนสำหรับสภาวะการทำงานปกติ (Normal Zone) ซึ่งอาจนำไปสู่การตีความหม้อแปลงปกติว่าเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นได้ [21] นอกจากนี้ วิธี Duval Triangle มีความไวสูงต่อความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนส่งผลให้ผลวิเคราะห์เอนเอียงไปทาง Thermal fault ได้ [17] งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี IEC gas ratio ในการวิเคราะห์ความผิดปกติโดยใช้ Fuzzy logic เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และเป็นมาตรฐานที่ใช้แพร่หลาย สะดวกในการโปรแกรมโดยใช้ข้อมูล DGA ชุดเดียวกับการคำนวณ Health index ไม่ต้องหาจุดตัดบนกราฟสามเหลี่ยม ทั้งนี้อาจทำการวิเคราะห์ความผิดปกติร่วมกับวิธีอื่น ๆ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์

โดยในการวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจะพิจารณาตามมาตรฐาน IEEE C57-104-2008 [22] ใน Table 14 โดยหากผลรวมของ TDCG เกินค่ามาตรฐานและอยู่ในเงื่อนไขที่ 3 ขึ้นไป จะนำแก๊สบางชนิดมาวิเคราะห์หาความผิดปกติเพิ่มเติม แต่หากผลรวมแก๊ส TDCG ต่ำกว่าเงื่อนไขที่ 3 ให้ตรวจสอบเพิ่มเติมและประเมินแก๊สที่ถูกผลิตขึ้นต่อวัน

Table 14 Transformer condition based on Dissolved Gas Levels in oil according to IEEE C57-104-2008 Standard [22]

Gas	Status (ppm)			
	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Hydrogen (H ₂)	< 100	101-700	701-1800	>1800
Methane (CH ₄)	< 120	121-400	401-1000	>1000
Acetylene (C ₂ H ₂)	< 1	2-9	10-35	>35
Ethylene (C ₂ H ₄)	< 50	51-100	101-200	>200
Ethane (C ₂ H ₆)	< 65	66-100	101-150	>150
Carbon Monoxide (CO)	< 350	351-570	571-1400	>1400
Carbon Dioxide (CO ₂)	< 2500	2500-4000	4001-10000	>10000
TDCG	<= 720	721-1920	1921-4630	>4630

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอัตราส่วนแก๊สด้วยวิธี IEC ratio ด้านอินพุต ในบทความ [18] ทำการวิเคราะห์ความผิดพลาดด้วยวิธีของ Rogers และ IEC พบว่า ผลของวิธี IEC มีความแม่นยำมากกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี IEC ในการวิเคราะห์หาความผิดพลาดด้วยฟuzzyลอจิก วิธี IEC เป็นวิธีที่นิยมใช้ [18-20] จะใช้อัตราส่วนแก๊ส 3 อัตราส่วน คือ C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 และ C_2H_4/C_2H_6 โดยรายละเอียดอัตราส่วนแก๊ส รหัสอัตราส่วน และช่วงของค่าอัตราส่วนแก๊สแสดงดัง Table 15 และการระบุความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแสดงใน Table 16 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอัตราส่วนแก๊สด้วยวิธี IEC ratio ด้านอินพุตแสดงใน Figure 9 ถึง Figure 11

Table 15 Gas ratios and codes of the IEC Ratio Method [20]

Ratio Code	Range	Code
n (C_2H_2/C_2H_4)	≤ 0.1	0
	$\geq 0.1, \leq 3$	1
	> 3	2
k (CH_4/H_2)	≤ 0.1	1
	$\geq 0.1, \leq 1$	0
	> 1	2
m (C_2H_4/C_2H_6)	≤ 1	0
	$\geq 1, \leq 3$	1
	> 3	2

Table 16 Fault detection in transformers using the IEC Ratio Method [20]

No	n	k	m	Diagnosis
1	0	0	0	Normal Ageing
2	0	1	0	Partial Discharge of Low Energy Density
3	1	1	0	Partial Discharge of High Energy Density
4	1-2	0	1-2	Discharge of Low Energy
5	1	0	2	Discharge of High Energy
6	0	0	1	Thermal Fault ($<150^\circ C$)
7	0	2	0	Thermal Fault ($150^\circ C - 300^\circ C$)
8	0	2	1	Thermal Fault ($300^\circ C - 700^\circ C$)
9	0	2	2	Thermal Fault ($>700^\circ C$)

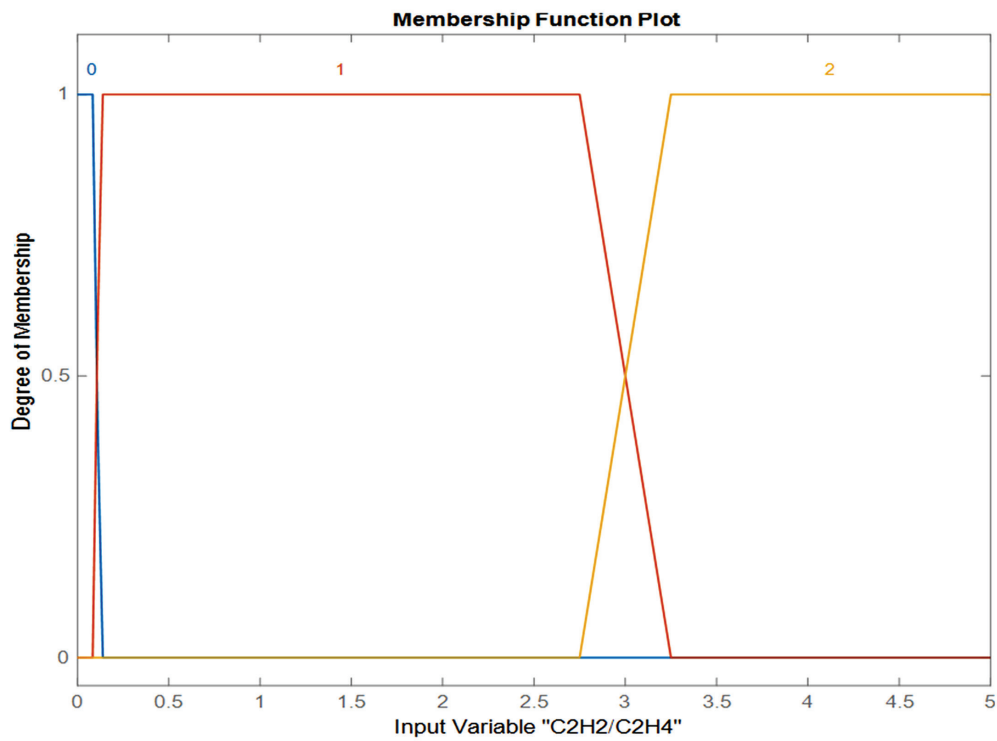


Figure 9 Fuzzy membership function for gas ratios C2H2/C2H4 [18, 20]

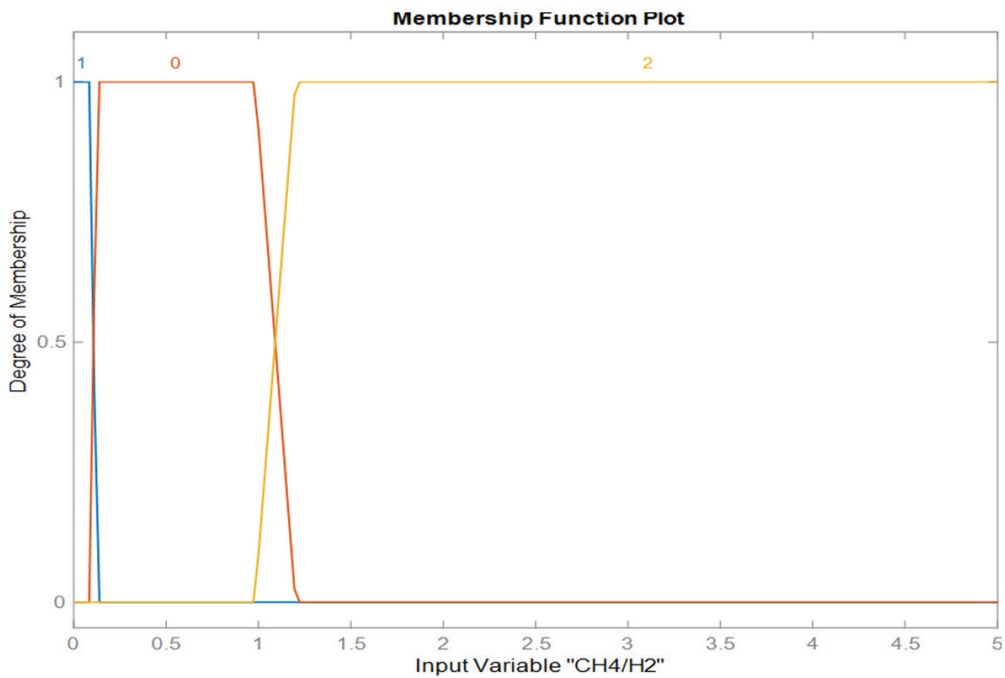


Figure 10 Fuzzy membership function for gas ratios CH4/H2 [18, 20]

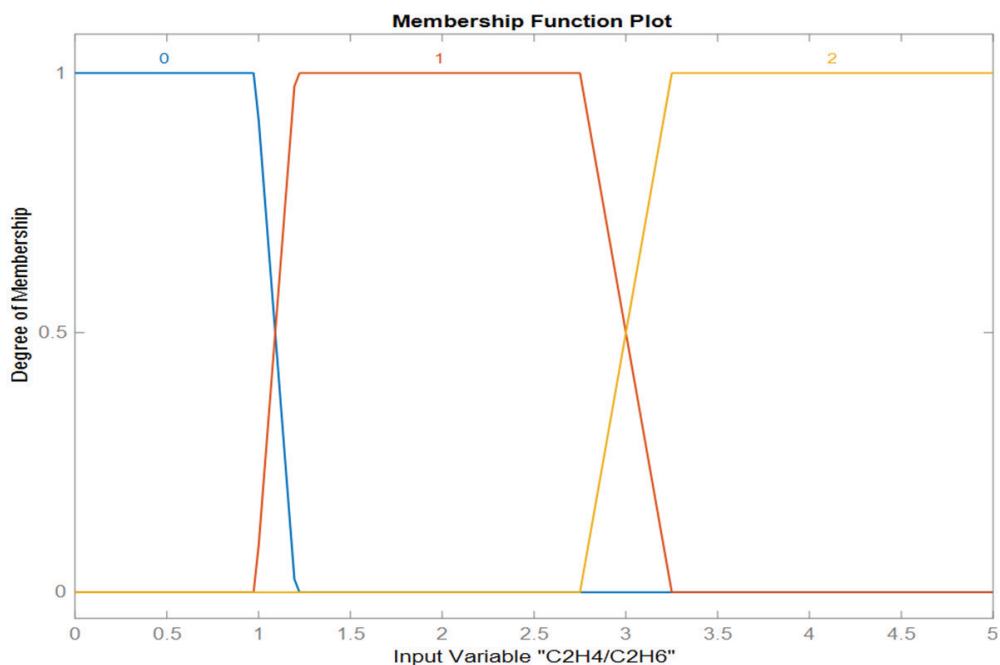


Figure 11 Fuzzy membership function for gas ratios C_2H_4/C_2H_6 [18, 20]

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอัตราส่วนแก๊สของวิธี IEC ratio method ทางด้านเอาต์พุตจะแสดงประเภทของการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงทั้ง 9 ประเภท ตาม Table 16 ดังแสดงใน Figure 12

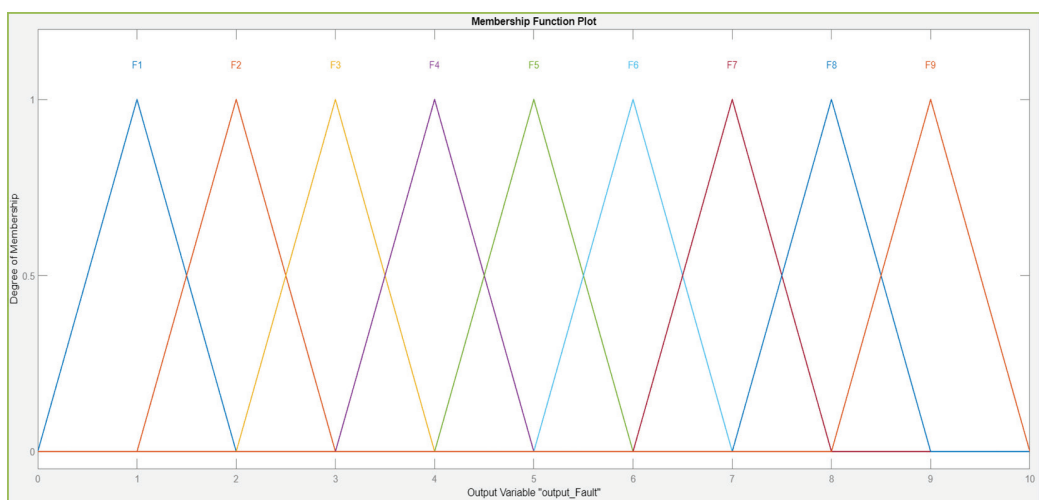


Figure 12 Fuzzy output membership function of the IEC Ratio Method

- การสร้างกฎฟัซซีเพื่อใช้วิเคราะห์หาความผิดปกติของ จะนำข้อมูลใน Table 16 มาสร้างเป็นกฎฟัซซีตามรหัสการเกิดความผิดปกติพร้อมได้ทั้งหมด 11 กฎ แสดงดัง Table 17

Table 17 Fuzzy logic rules for fault analysis using the IEC Ratio Method

Rule	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ Code			CH ₄ /H ₂ Code			C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ Code			Fault	Diagnosis
	0	1	2	0	1	2	0	1	2		
1	x			x			x			F1	Normal Ageing
2	x				x		x			F2	PD of Low Energy Density
3		x			x		x			F3	PD of High Energy Density
4		x		x				x		F4	Discharge of Low Energy
5			x	x				x		F4	Discharge of Low Energy
6			x	x					x	F4	Discharge of Low Energy
7		x		x					x	F5	Discharge of High Energy
8	x			x				x		F6	Thermal Fault (<150 °C)
9	x					x	x			F7	Thermal Fault (150 °C - 300 °C)
10	x					x		x		F8	Thermal Fault (300 °C - 700 °C)
11	x					x			x	F9	Thermal Fault (>700 °C)

Results and Discussion

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก และฟัซซีลอจิก ร่วมกับการวิเคราะห์การเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงด้วยวิธี IEC ratio กับข้อมูลการตรวจวัดเพื่อการบำรุงรักษาหม้อแปลงจำหน่ายของสถานประกอบการทั้งสิ้น 23 เครื่อง รายละเอียดพิกัดกำลังไฟฟ้าและแรงดันแสดงดัง Table 18 ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Table 18 Power and voltage ratings of distribution transformers for industrial facility

Power Rating (kVA)	Voltage (V)	No. of Transformer
2000	6600/400	10
1800	6600/720	3
1000	6600/400	2
900	6600/460	1
530	6600/520	5
270	6600/460	2

ผลการวิเคราะห์หาดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่าย

ผลการหาค่าดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก และวิธีฟัซซีลอจิกของหม้อแปลงทั้ง 23 เครื่อง แสดงใน Table 19

Table 19 Health index assessment of distribution transformers using the weight factor method and fuzzy logic approach

Tr. No	Gas (ppm)									BDV (kV)	WC (ppm)	Age (Year)	Health Index			
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	TDCG	%DGAF				Weight factor		Fuzzy logic	
1	3	0	19	0	0	181	1993	203	100.00	71.8	13	26	85.00	VG	0.89	VG
2	6	1	44	0	0	655	2377	706	95.83	74.6	19	29	85.00	VG	0.7	G
3	8	2	3	2	0	948	4091	963	75.00	60.3	45	29	62.50	M	0.47	M
4	147	374	845	247	75	375	7012	2063	47.50	53.5	35	29	56.25	M	0.12	B
5	29	3	7	2	0	732	4256	773	79.17	24.2	41	29	55.00	M	0.23	B
6	15	1	10	2	0	749	3743	777	83.33	75.5	76	29	62.50	M	0.47	M
7	6	2	16	2	0	878	4363	904	79.17	71.9	68	29	62.50	M	0.47	M
8	9	0	33	2	0	474	2637	518	91.67	68.9	14	26	85.00	VG	0.7	G
9	9	6	5	3	0	679	3566	702	87.50	75.5	32	29	70.00	G	0.47	M
10	12	2	6	2	0	700	3252	722	87.50	41.4	29	29	70.00	G	0.45	M
11	10	3	7	3	0	661	3449	684	87.50	44.2	31	29	70.00	G	0.41	M
12	13	3	6	2	0	708	3343	732	83.33	60.6	30	29	70.00	G	0.48	M
13	7	1	6	3	0	519	2467	536	95.83	46.7	28	29	70.00	G	0.47	M
14	17	14	7	5	0	1249	4308	1292	70.83	75.5	31	29	70.00	G	0.23	B
15	112	525	478	214	4	598	4350	1931	44.17	42.6	34.5	29	56.25	M	0.13	B

Table 19 Health index assessment of distribution transformers using the weight factor method and fuzzy logic approach (continued)

Tr.	Gas (ppm)									BDV (kV)	WC (ppm)	Age (Year)	Health Index			
	No	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	TDCG	%DGAF			Weight factor		Fuzzy logic	
16	13	3	20	3	0	859	5648	898	75.00	50	43	29	70.00	G	0.43	M
17	13	1	7	2	0	717	2882	740	87.50	75.5	18	29	85.00	VG	0.7	G
18	997	98	113	145	3	574	7946	1930	40.85	47	33	29	56.25	M	0.16	B
19	329	189	312	82	664	623	7468	2199	48.33	74	61	29	48.75	B	0.06	VB
20	88	6	10	3	0	1414	4915	1521	66.67	73.7	25	29	70.00	G	0.23	B
21	3	0	103	68	14	521	10424	1990	35.00	38.7	81	29	48.75	B	0.06	VB
22	6	1	1	5	0	64	1330	81	100.00	59	11	17	85.00	VG	0.89	VG
23	8	2	1	5	0	61	1048	79	100.00	64.8	10	17	85.00	VG	0.89	VG

Note: VG = Very good G = Good M = Moderate B = Bad VB = Very bad

ผลการประเมินค่าดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก และวิธีฟัซซีลอจิกใน Table 19 จากหม้อแปลงทั้งหมดจำนวน 23 เครื่อง พบว่าทั้ง 2 วิธี มีผลการวิเคราะห์สภาพตรงกัน 6 เครื่อง ได้แก่ เครื่องที่ 1, 3, 6, 7, 22 และ 23 ส่วนที่เหลือ 17 เครื่อง ได้ผลไม่ตรงกัน แบ่งเป็น 15 เครื่อง ที่ผลจากวิธีฟัซซีลอจิกได้ผลการประเมินดัชนีสุขภาพแย่กว่าวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก 1 ระดับ ได้แก่ เครื่องที่ 2, 4, 5, 8 – 13, 15 - 19 และ 21 และอีก 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่องที่ 14 และ 20 ที่ผลจากวิธีฟัซซีลอจิกได้ผลการประเมินดัชนีสุขภาพแย่กว่าวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก 2 ระดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลค่าปัจจัยสภาพต่าง ๆ แล้วพบว่า วิธีฟัซซีลอจิกให้ผลการประเมินระดับสุขภาพของหม้อแปลงได้เหมาะสมมากกว่าวิธีค่าถ่วงน้ำหนัก ตัวอย่างเช่น

ผลระดับสุขภาพของหม้อแปลงเครื่องที่ 1 ด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนักและวิธีฟัซซีลอจิกเป็น Very good ทั้งคู่ แต่เมื่อเทียบกับเครื่องที่ 2 ที่วิธีค่าถ่วงน้ำหนักได้ระดับสุขภาพเป็น Very good ส่วนวิธี ฟัซซีลอจิกเป็น Good ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า หม้อแปลงเครื่องที่ 2 มีผลการตรวจวัดพบแก๊สที่ละลายในน้ำมันสูงกว่าเครื่องที่ 1 มาก นอกจากนี้ยังมีปริมาณน้ำในฉนวนน้ำมันสูงกว่า และอายุการใช้งานมากกว่าด้วย แม้ว่าจะทนแรงดันเบรกดาวนได้สูงกว่าแต่ก็สูงกว่าเพียงเล็กน้อย ดังนั้นหม้อแปลงเครื่องที่ 1 จึงควรได้ผลระดับสุขภาพต่างจากเครื่องที่ 2 กรณีนี้ผลจากวิธีฟัซซีลอจิกมีความเหมาะสมกว่า

ผลระดับสุขภาพของหม้อแปลงเครื่องที่ 4 ด้วยวิธีค่าถ่วงน้ำหนักได้ระดับสุขภาพเป็น Moderate แต่วิธีฟัซซีลอจิกเป็น Bad ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า ผลรวมแก๊สที่ละลายในน้ำมันสูงมาก มีปริมาณน้ำในฉนวนน้ำมันสูง และมีอายุการใช้งานมาก ดังนั้นผลของวิธีฟัซซีลอจิกจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

ผลดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายที่ได้ในงานวิจัยนี้ ใช้ปัจจัยในการประเมินสภาพของหม้อแปลงจำหน่ายจากข้อมูลที่มีการตรวจวัดจริงของกิจกรรมการบำรุงรักษาประจำปี ซึ่งโดยปกติข้อมูลการตรวจวัดหม้อแปลงจำหน่ายจะไม่ได้ทำการตรวจวัดมากเท่ากับหม้อแปลงกำลัง เป็นการประเมินสภาพโดยรวมจากข้อมูลที่มีอยู่

เพื่อใช้ในการจัดลำดับความวิกฤตของหม้อแปลงแต่ละเครื่องประกอบการตัดสินใจเลือกกิจกรรมบำรุงรักษาตามสภาพแต่ละเครื่องและตามงบประมาณที่มีอยู่ แต่หากในอนาคตมีการเก็บข้อมูลอื่น ๆ มากขึ้น ก็จะทำให้ผลการประเมินมีความแม่นยำมากขึ้น

ผลการวิเคราะห์ความผิดปกติของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยฟัซซี่ลอจิก

การวิเคราะห์ความผิดปกติของหม้อแปลงจำหน่ายตามเกณฑ์มาตรฐาน IEEE C57. 104 – 2008 ระบุว่าหากผลรวมของแก๊ส TDCG มากกว่า 1921 ppm อาจมีการเกิดความผิดปกติขึ้นภายในหม้อแปลง จึงทำการวิเคราะห์แก๊สเพิ่มเติมเพื่อหาชนิดของความผิดปกติ โดยข้อมูลการตรวจวัดแก๊สที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจำหน่ายจำนวน 23 เครื่อง พบว่ามีหม้อแปลงจำนวน 5 เครื่อง ที่มีผลรวมของแก๊ส TDCG มากกว่า 1921 ppm ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาความผิดปกติของหม้อแปลงโดยวิธี IEC ratio ด้วยฟัซซี่ลอจิกกับหม้อแปลงทั้ง 5 เครื่องนี้ ได้ผลการวิเคราะห์ความผิดปกติของหม้อแปลงดัง Table 20

Table 20 Fault analysis and diagnosis of distribution transformers using fuzzy logic

Tr. No	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Code	Fault Index	Fault Type
4	147	374	845	247	75	0 2 2	8.52	Thermal fault (>700 °C)
15	112	525	478	214	4	0 2 1	7.48	Thermal fault (300 °C - 700 °C)
18	997	98	113	145	3	0 0 1	1.50	Partial discharge of low energy density
19	329	189	312	82	664	1 0 2	4.50	Discharge of high energy
21	745	539	103	68	14	1 0 1	3.51	Discharge of low energy

จากผลการวิเคราะห์หาความผิดปกติของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยฟัซซี่ลอจิกพบว่า มีหม้อแปลง 2 เครื่อง ที่เกิดความผิดปกติจากการเกิดความร้อนสูง คือ เครื่องที่ 4 เกิด Thermal fault (>700 °C) และเครื่องที่ 15 เกิด Thermal fault (300 °C - 700 °C) หม้อแปลงที่เกิดความผิดปกติรุนแรงรองลงมาได้แก่ เครื่องที่ 19 เกิด Discharge of high energy และเครื่องที่ 21 เกิด Discharge of low energy สุดท้ายหม้อแปลงเครื่องที่ 18 เกิด Partial discharge of low energy density ซึ่งหม้อแปลงทั้ง 5 เครื่องนี้ก็ยังได้ผลการประเมินระดับสุขภาพระดับที่ไม่ดีสอดคล้องกันด้วยคือ Bad และ Very bad

Conclusions

การบำรุงรักษาหม้อแปลงจำหน่ายเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ต้นทางที่แปลงแรงดันกลางให้เป็นแรงดันต่ำเพื่อจ่ายไฟให้กับสถานประกอบการ ซึ่งหากสามารถจัดการบำรุงรักษาหม้อแปลงตามสภาพของหม้อแปลงได้ จะช่วยให้ลดปัญหาไฟฟ้าขัดข้อง เพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า และเกิดการใช้จ่ายอย่างคุ้มค่า วิธีการประเมินสภาพของหม้อแปลงที่นิยมใช้มีด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธี Weight factor และวิธี Fuzzy logic งานวิจัยนี้ได้เสนอการหาดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงระบบจำหน่ายด้วยทั้ง 2 วิธี โดยปัจจัยที่ใช้ในการประเมินดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงของวิธี Weight factor ได้แก่ แก๊สที่ละลายในฉนวนน้ำมัน 7 ชนิด (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO และ CO_2) ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนน้ำมัน ปริมาณน้ำในฉนวนน้ำมัน และอายุการใช้งานของหม้อแปลง โดยมีการให้คะแนนและน้ำหนักของแต่ละปัจจัย ส่วนวิธี Fuzzy logic จะใช้ปัจจัยเช่นเดียวกับวิธี Weight factor ต่างกันที่แก๊สที่ละลายในฉนวนน้ำมันจะใช้ 6 ชนิด ยกเว้น CO_2 และมีการกำหนด Membership function ให้กับแต่ละปัจจัย โดยมีการสร้างกฎของฟัซซี่ 19 กฎที่ได้มาจากการสอบถามจากผู้ที่มีประสบการณ์และความเชี่ยวชาญด้านการบำรุงรักษาหม้อแปลงระบบจำหน่าย

ผลการประเมินดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงระบบจำหน่ายที่ได้จากทั้ง 2 วิธี ใน Table 19 พบว่า วิธี Fuzzy logic จะให้ผลการประเมินที่ดีกว่า โดยสามารถแยกระดับสภาพของหม้อแปลงได้สอดคล้องกับข้อมูลปัจจัยที่ใช้ประเมินมากกว่าวิธี Weight factor เนื่องจากวิธี Fuzzy logic ใช้การตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ที่เลียนแบบวิธีคิดและการตัดสินใจที่ซับซ้อนของมนุษย์ แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 2 วิธี ก็ยังเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ประเมินสภาพหม้อแปลงเพื่อใช้ประกอบการจัดแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงได้ โดยวิธี Weight factor นั้นมีข้อดีคือ ง่าย และสะดวกในการใช้งาน ส่วนวิธี Fuzzy logic ให้ผลการประเมินที่ตรงกับผลการตรวจวัดมากกว่า แต่ก็มีข้อขัดข้องในการใช้งานมากกว่า ซึ่งหากมีข้อมูลผลการตรวจวัดสภาพของหม้อแปลงจำนวนที่มากขึ้น หลากหลายสภาพการใช้งาน และมีข้อมูลเหตุขัดข้องย้อนหลัง จะช่วยให้สามารถนำมาปรับปรุงขึ้น ความเป็นสมาชิกของวิธี Fuzzy logic ให้ผลดัชนีสุขภาพมีความแม่นยำมากขึ้น

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงโดยใช้วิธี IEC ratio ด้วย Fuzzy logic ซึ่งวิธีนี้จะใช้อัตราส่วนแก๊สที่ละลายในฉนวนน้ำมัน 3 อัตราส่วน ได้แก่ C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 และ C_2H_4/C_2H_6 โดยจะทำการวิเคราะห์เฉพาะหม้อแปลงเครื่องที่มีผลรวมของปริมาณแก๊ส TDCG มากกว่า 1921 ppm เท่านั้น จากผลการวิเคราะห์พบว่า มีจำนวน 5 เครื่อง ที่ต้องนำมาวิเคราะห์หาความผิดปกติ ดังแสดงใน Table 20 ประกอบกับผลการประเมินดัชนีสุขภาพของทั้ง 5 เครื่องนี้ มีระดับสุขภาพ Bad และ Very bad ดังนั้นหม้อแปลงเหล่านี้ จึงควรได้รับงบประมาณในการบำรุงรักษาเป็นอันดับต้น ๆ

Acknowledgements

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับโครงการวิจัยมูลฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สัญญาเลขที่ FRB6703/2567/ รหัสโครงการ 192849/ โครงการวิจัย เรื่อง การคำนวณหาดัชนีสุขภาพหม้อแปลง

จำหน่ายพิจารณาตามรูปแบบการเกิดฟอลต์ ปีงบประมาณ 2567 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนอันมีคุณค่านี้

References

1. Brown, R. 2009. Electric Power Distribution Reliability. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.
2. Hanafiah, M.A.M., Raman, S.H., Wan Jusoh, W.N.S.E., Ab. Ghani, M.R. and Baharudina, Z.A. 2013. Development of a novel fault management in distribution system using distribution automation system in conjunction with GSM communication. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2, 329-335.
3. Su, C.L. and Teng, J.H. 2007. Economic evaluation of a distribution automation project. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43, 1417–1424. [https://doi.org/ 10.1109/TIA.2007.908192](https://doi.org/10.1109/TIA.2007.908192)
4. Wang, L. 2016. The fault causes of overhead lines in distribution network. *MATEC Web of Conferences*, 61, 02017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166102017>
5. NERC ACSETF, 2014. AC Substation Equipment Failure Report. Atlanta, Georgia.
6. Jahromi, A.N., Piercy, R., Cress, S. and Wang, F. 2009. An approach to power transformer asset management using health index. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25, 20-34. <https://doi.org/10.1109/MEI.2009.4819021>
7. Naderian, A., Cress, S., Piercy, R., Wang, F. and Service, J. 2008. An approach to determine the health index of power transformers. *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vancouver, Canada, 192-196.
8. Jürgensen, J.H., Godin, A.S. and Hilber, P. 2017. Health index as condition estimator for power system equipment: A critical discussion and case study. *International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Open Access Proceeding Journal*, 2017 (1), 202–205. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1174>
9. Chittaveera, K. and Damrongkulkamjorn, P. 2017. Health index of MEA power transformers for preventive maintenance by using fuzzy analytic hierarchy process. *Kasetsart Engineering Journal*, 30, 33-42.
10. Rodkumnerd, P., 2019. Condition-Based Risk Management of Distribution Transformers. Master of Engineering Thesis, Electrical Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 91.

11. Medina, R.D., Lata, J.P., Chacón, D.P., Morales, D.X., Bermeo, J.P. and Medina, A.E. 2016. Health index assessment for power transformers with thermal upgraded paper up to 230 kV using fuzzy inference systems. *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Coimbra, Portugal, <https://doi.org/10.1109/UPEC.2016.8114058>
12. IEEE Power and Energy Society. 2015. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment, IEEE Std C57.106™-2015, IEEE, New York, 38. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7442048>
13. Abu-Elanien, E.B., Salama, M.M.A. and Ibrahim, M. 2012. Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27, 2029-2036. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2205165>
14. Chandel, A.K. and Chandel, R. 2017. Expert system for condition monitoring of power transformer using fuzzy logic. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.1063/1.4995648>
15. Mharakurwa, E.T. and Goboza, R. 2019. Multiparameter-based fuzzy logic health index assessment for oil-immersed power transformers. *Hindawi Advances in Fuzzy Systems*, 2019, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/2647157>
16. Shokrollahi, A., Sangrody, H., Motalleb, M., Rezaeiahari, M., Foruzan, E. and Hassanzadeh, F. 2017. Reliability assessment of distribution system using fuzzy logic for modelling of transformer and line uncertainties. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, Morgantown, USA, <https://doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107257>
17. Lone Larona Mogotsi, Akhtar Rasool, Edwin Matlotse, Sadaqat Ali, Ahmed Ali. 2025. Intelligent fault detection of MV/HV transformers using fuzzy logic based on DGA. *MDPI Electrical and Electronic Engineering (Eng)*, 6, 228. <https://doi.org/10.3390/eng6090228>
18. Mohamad, F., Hosny, K. and Barakat, T. 2019. Incipient fault detection of electric power transformers using fuzzy logic based on Roger's and IEC method. *14th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, Cairo, Egypt, 303-309. <https://doi.org/10.1109/ICCES48960.2019.9068132>
19. Ibrahim, B.M.T., Hoballah, A. and Ghoneim, S.S.M. 2020. Optimal ratio limits of Rogers' four-ratios and IEC 60599 code methods using particle swarm optimization fuzzy-logic approach. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27, 222-230. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008395>

20. Ahmed, M.R., Geliel, M.A. and Khalil, A. 2013. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. *21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Platanias, Greece, 584-589. <https://doi.org/10.1109/MED.2013.6608781>
21. Manisha, Kaur, K., Sharma, N.K., Singh, J. and Bhalla, D. 2022. Performance assessment of IEEE/IEC method and duval triangle technique for transformer incipient fault diagnosis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1228, 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1228/1/012027>
22. IEEE Power & Energy Society. 2008. Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.104-2008, IEEE, New York.