



การประยุกต์ฟuzzyลอจิกสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV  
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Fuzzy Logic Application for Condition Assessment in 33 kV Distribution  
Transformer of Provincial Electricity Authority

จำเอกกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ

Petty Officer First Class Kittisak Chaisuwan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering  
Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประยุกต์ฟuzzyลอจิกสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV  
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Fuzzy Logic Application for Condition Assessment in 33 kV Distribution  
Transformer of Provincial Electricity Authority

จำเอกกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ

Petty Officer First Class Kittisak Chaisuwan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การประยุกต์ฟิสิกส์ลอจิกสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV  
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค  
**ผู้เขียน** จำเอนกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ  
**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

---

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
( ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล )

..... ประธานกรรมการ  
( ดร.มงคล แซ่เจีย )

..... กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น )

..... กรรมการ  
( ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เถกิง วงศ์ศิริโชติ )  
รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี  
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....

( ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสภณกุล )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ .....

( จำเอกกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ )

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน  
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

( จำเอกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ )

นักศึกษา

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การประยุกต์ฟuzzyลอจิกสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV  
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

**ผู้เขียน** จำเอกกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**ปีการศึกษา** 2565

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ด้วยดัชนีสุขภาพ (Health Index) โดยการใช้วิธีตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ จากข้อมูลที่ใช้สำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ คุณภาพน้ำมัน อายุการใช้งาน การตรวจสอบสภาพภายนอก ค่าความเป็นฉนวนของขดลวด และการรับภาระโหลด ที่ได้จากการบำรุงรักษาในแต่ละปี จำนวน 180 ตัวอย่าง แบ่งเป็นตัวอย่างสำหรับนำมาฝึกอบรม (Train) จำนวน 150 ตัวอย่าง และตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบ (Test) จำนวน 30 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพดี กลุ่มที่ 2 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพยอมรับได้ กลุ่มที่ 3 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพแย่มาก กลุ่มที่ 4 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพแย่มาก ซึ่งการออกแบบได้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู สำหรับแต่ละปัจจัย และระดับสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า การกำหนดค่าน้ำหนักของทั้ง 5 ปัจจัย ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) จากค่าเอาต์พุตจากการตัดสินใจด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือในแต่ละปัจจัยจำนวน 150 ตัวอย่าง (Train) เพื่อจะนำไปคำนวณหาค่าดัชนีสุขภาพ และระดับกลุ่มสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ผลการทดสอบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า จากการนำข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบจำนวน 30 ตัวอย่าง มาป้อนเข้าระบบประเมินที่ได้ออกแบบ แล้วนำค่าระดับสภาพที่ระบบประเมินได้เปรียบเทียบกับข้อมูลสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจริงของกลุ่มทดสอบ พบว่าจากตัวอย่าง 30 ตัวอย่าง สามารถประเมินสภาพได้ตามสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจริงจำนวน 25 ตัวอย่าง และมีความผิดพลาดจำนวน 5 ตัวอย่าง คิดเป็นความถูกต้อง 83.33% โดยการวางแผนบำรุงรักษาลำดับ ก่อน-หลัง สามารถพิจารณาจากระดับกลุ่มสภาพจาก แย่มาก แย่ ยอมรับได้ และดี ตามลำดับ

**คำสำคัญ** : หม้อแปลงไฟฟ้า, ระบบจำหน่าย, ฟuzzyลอจิก, การประเมินสภาพ

<b>Thesis Title</b>	Fuzzy Logic Application for Condition Assessment in 33 kV Distribution Transformer of Provincial Electricity Authority
<b>Author</b>	Petty Officer First Class Kittisak Chaisuwan
<b>Major Program</b>	Electrical Engineering
<b>Academic Year</b>	2022

### ABSTRACT

The objective of this research was to condition assess 33 kV distribution transformers by Health Index using fuzzy logic analytical decision-making methods. The data for the assessment of transformer condition consisted of 5 factors: oil quality; aging; visual inspection; winding insulation; and load from the results of maintenance each year. The 180 samples are divided into 150 samples for training and 30 samples for testing, which are divided into 4 groups: group 1 is a transformer in good condition; group 2 is a transformer in acceptable condition; group 3 is a transformer in poor condition; and group 4 is a transformer in very poor condition. The design uses the triangular, the square, and the trapezoid membership function for the each factors and the transformer condition level. The weighting of the 5 factors was determined using an artificial neural network (ANN) method based on the fuzzy logic decision output values for each of 150 samples (Train) to calculate the health index and the transformer condition level. The results of testing transformer condition assessment system from the data of 30 test transformers were sent into the designed assessment system. Then compare the condition level values assessed by the system with the actual transformer conditions. It was found that out of 30 samples, the condition could be assessed according to the actual transformer condition of 25 samples, and there were 5 samples of errors, representing an accuracy of 83.33%. The maintenance planning in sequence before-after can be considered at the condition group level from very poor, poor, acceptable, and good, respectively.

**Keyword :** Transformer, Distribution, Fuzzy Logic, Condition Assessment

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.มงคล แซ่เจี๋ย ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นประธานกรรมการสอบป้องกัน วิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนิน ไปได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น กรรมการสอบป้องกัน วิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ต่อการทำงานวิจัย และช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักกฤตว์ ดวงสร้อยทอง กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็น ประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เปิดโอกาสในการศึกษาแก่ผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยได้พบกับประสบการณ์ที่ดี ผู้วิจัยมีความรู้สึกประทับใจ และภูมิใจในความเป็นลูกพระบิดา อย่างที่สุด

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และให้ โอกาสพนักงานได้ศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้น เพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้รับกลับไปพัฒนาองค์กรต่อไป

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้โอกาส และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา สุดท้ายนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นอกจากจะเป็นประโยชน์ใน การศึกษาของผู้วิจัยเองแล้ว หวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และผู้อ่านทุกท่าน ซึ่งคุณความดีที่เกิดขึ้นผู้วิจัยขอมอบให้แก่ทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สมบูรณ์ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ และขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

จำเอนกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	(5)
ABSTRACT.....	(6)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(11)
รายการภาพประกอบ.....	(12)
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย.....	1
1.2 การทบทวนวรรณกรรม.....	2
1.3 ประเด็นการวิจัย.....	16
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	16
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
1.6 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	17
1.8 แผนการดำเนินงาน.....	18
<b>บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>19</b>
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า.....	19
2.2 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	22
2.3 แนวคิดเกี่ยวกับปัจจัยประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	24
2.4 แนวคิดเกี่ยวกับดัชนีสุขภาพ (Health Index) ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	30
2.5 แนวคิด ทฤษฎี เกี่ยวกับตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic).....	33
2.6 แนวคิด ทฤษฎี เกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANN).....	47

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 แนวคิดเกี่ยวกับประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	50
<b>บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการวิจัย.....</b>	<b>53</b>
3.1 บทนำ.....	53
3.2 การออกแบบปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	54
3.3 การออกแบบตัวแปรเอาต์พุตของทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลง (Pre-HI : Pre-Health Index).....	74
3.4 การประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากตัวแปรเอาต์พุตทั้ง 5 ปัจจัย.....	76
3.5 การออกแบบค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	77
3.6 การเก็บข้อมูลสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	78
3.7 การทดสอบและการประเมินผลการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	79
3.8 กรอบแนวทางการวิจัย.....	80
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....</b>	<b>81</b>
4.1 ผลการออกแบบปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	81
4.2 ผลการกำหนดค่าน้ำหนักของทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	96
4.3 ผลการทดสอบและการประเมินผลการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	97
4.4 อภิปรายผลการศึกษา.....	101
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>103</b>
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม .....	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบและประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า กฎฟิซซีของค่าความเป็นฉนวนของขดลวด และคำสั่งโปรแกรมภาษา Python – Jupyter Notebook.....	108
ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการ.....	135
ประวัติผู้เขียน .....	150

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1-1 จำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	2
ตารางที่ 1-2 ตารางเปรียบเทียบการทบทวนวรรณกรรม.....	14
ตารางที่ 1-3 แผนการดำเนินงาน.....	18
ตารางที่ 2-1 ปัจจัยการทดสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	25
ตารางที่ 2-2 การจัดลำดับคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	26
ตารางที่ 2-3 ปัจจัยการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	26
ตารางที่ 2-4 การจัดลำดับการประเมินสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	27
ตารางที่ 2-5 การจัดลำดับการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	28
ตารางที่ 2-6 การจัดลำดับการประเมินค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	29
ตารางที่ 2-7 การประเมินการจ่ายโหลด.....	30
ตารางที่ 2-8 การจัดลำดับคุณภาพสภาวะการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	30
ตารางที่ 2-9 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	31
ตารางที่ 2-10 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	31
ตารางที่ 2-11 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
ตารางที่ 2-12 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
ตารางที่ 2-13 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
ตารางที่ 2-14 น้ำหนักดัชนีสุขภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของแต่ละปัจจัย.....	33
ตารางที่ 2-15 รูปแบบฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอน.....	49
ตารางที่ 3-1 ระดับผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	55
ตารางที่ 3-2 ระดับผลการทดสอบค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	57
ตารางที่ 3-3 การจัดคะแนนคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	59
ตารางที่ 3-4 ระดับช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	60
ตารางที่ 3-5 ระดับช่วงคะแนนเอชทีพุดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	62
ตารางที่ 3-6 ปัจจัยการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	62
ตารางที่ 3-7 ระดับการเสื่อมสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	63
ตารางที่ 3-8 ระดับช่วงคะแนนเอชทีพุดของการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า...	64

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3-9 ระดับสภาพของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์.....	64
ตารางที่ 3-10 การจัดคะแนนค่าสภาพความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	69
ตารางที่ 3-11 การประเมินการจ่ายโหลด.....	70
ตารางที่ 3-12 ระดับการประเมินค่าภาวะการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	73
ตารางที่ 3-13 ระดับคะแนนตัวแปรเอาต์พุตของทั้ง 5 ปัจจัย.....	75
ตารางที่ 3-14 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	77
ตารางที่ 3-15 การปรับฐานข้อมูลของค่าดัชนีสุขภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	78
ตารางที่ 4-1 กฎพีซีซีของค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า คุณภาพสีของน้ำมัน หม้อแปลงไฟฟ้า และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลง ไฟฟ้า.....	84
ตารางที่ 4-2 กฎพีซีซีของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า และเอาต์พุตของค่าอายุการใช้งาน หม้อแปลงไฟฟ้า.....	86
ตารางที่ 4-3 กฎพีซีซีของค่าการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า และค่า ระดับ สภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอก หม้อแปลงไฟฟ้า.....	88
ตารางที่ 4-4 กฎพีซีซีของอัตราการจ่ายโหลด กับค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด.....	94
ตารางที่ 4-5 กฎพีซีซีของการประเมินค่าภาวะการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า กับระดับสภาพ หม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด.....	95
ตารางที่ 4-6 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละปัจจัยสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	96
ตารางที่ 4-7 ค่าน้ำหนักขั้นสุดท้ายของแต่ละปัจจัยสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	97
ตารางที่ 4-8 รายละเอียดผลทดสอบความถูกต้องของระบบประเมินจากชุดทดสอบ 30 ตัวอย่าง	99

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบ 1-1 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	1
ภาพประกอบ 1-2 วิธีการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	3
ภาพประกอบ 1-3 การหา CIS ของค่าฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	5
ภาพประกอบ 1-4 การออกแบบการรวมฟิวส์ลอคจิก.....	6
ภาพประกอบ 1-5 โครงสร้างวิธีการจัดหมวดหมู่ปัจจัยการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	7
ภาพประกอบ 1-6 ค่าความถูกต้องของการทดสอบทั้ง 4 แบบ (set-1).....	9
ภาพประกอบ 1-7 ค่าความถูกต้องของการทดสอบทั้ง 4 แบบ (set-2).....	9
ภาพประกอบ 1-8 ค่าความสัมพันธ์แต่ละปัจจัยของการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	11
ภาพประกอบ 1-9 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	12
ภาพประกอบ 2-1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	19
ภาพประกอบ 2-2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	20
ภาพประกอบ 2-3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	21
ภาพประกอบ 2-4 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปิดฉนวนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	21
ภาพประกอบ 2-5 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีถังอะไหล่ล้นน้ำมันหม้อแปลงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	21
ภาพประกอบ 2-6 สภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งาน.....	24
ภาพประกอบ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ากับอายุการใช้งาน.....	28
ภาพประกอบ 2-8 triangular membership function.....	35
ภาพประกอบ 2-9 trapezoidal membership function.....	36
ภาพประกอบ 2-10 Gaussian membership function.....	36
ภาพประกอบ 2-11 Bell-shaped membership function.....	37
ภาพประกอบ 2-12 Smooth Membership Function.....	37
ภาพประกอบ 2-13 Z-membership function.....	38
ภาพประกอบ 2-14 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks : ANN).....	48
ภาพประกอบ 3-1 การติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV.....	54
ภาพประกอบ 3-2 กรอบแนวทางการวิจัย.....	80

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบ 4-1 รูปแบบการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของงานวิจัย.....	81
ภาพประกอบ 4-2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	82
ภาพประกอบ 4-3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	82
ภาพประกอบ 4-4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	83
ภาพประกอบ 4-5 กราฟกฎฟuzzyของค่าคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	85
ภาพประกอบ 4-6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า.....	85
ภาพประกอบ 4-7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า.....	86
ภาพประกอบ 4-8 กราฟกฎฟuzzyของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า.....	87
ภาพประกอบ 4-9 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า.....	87
ภาพประกอบ 4-10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า.....	88
ภาพประกอบ 4-11 กราฟกฎฟuzzyของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า.....	89
ภาพประกอบ 4-12 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์.....	89
ภาพประกอบ 4-13 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ.....	90
ภาพประกอบ 4-14 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงต่ำกับกราวด์.....	90
ภาพประกอบ 4-15 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	91

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบ 4-16 กราฟกฎฟิซซีของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากความ เป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	92
ภาพประกอบ 4-17 กราฟกฎฟิซซีของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากความ เป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า.....	92
ภาพประกอบ 4-18 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราการจ่ายโหลด.....	93
ภาพประกอบ 4-19 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด.....	93
ภาพประกอบ 4-20 กราฟกฎฟิซซีของอัตราการจ่ายโหลด กับค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด	94
ภาพประกอบ 4-21 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการประเมินค่าภาวะการรั่วไหลของหม้อแปลง ไฟฟ้า.....	94
ภาพประกอบ 4-22 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระ โหลด.....	95
ภาพประกอบ 4-23 กราฟกฎฟิซซีของการประเมินค่าภาวะการรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้า กับระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด.....	96
ภาพประกอบ 4-24 ระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า.....	98
ภาพประกอบ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับโหลด และการจ่ายโหลดไม่สมดุล.....	102



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีหน้าที่ปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง (High Voltage) เป็นระดับแรงดันต่ำ (Low Voltage) เช่น ปรับลดจากระดับแรงดัน 33 กิโลโวลต์ (kV) มาเป็น 240/400 โวลต์ (V) เป็นต้น เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถใช้ไฟฟ้าได้ตามกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า และเกิดความปลอดภัยในการใช้ไฟฟ้า ประกอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานมีเป็นจำนวนมาก จึงถือได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบกำลังไฟฟ้า <sup>[9][11]</sup> อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีราคาที่สูงต้นทุนในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมที่มักจะสูงขึ้นตามอายุการใช้งาน ซึ่งหาก หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการชำรุด นอกจากจะทำให้งานด้านบริการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าหยุดชะงักลงแล้วยังส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 1-1 หม้อแปลงไฟฟ้า

การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบัน จึงมักมุ่งเน้นในการบำรุงรักษาหม้อแปลงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า วิเคราะห์หาสาเหตุของการเสื่อมสภาพ และแนวทางการแก้ไขให้หม้อแปลงไฟฟ้ากลับมาใช้งานได้มี

ประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถรับและจ่ายไฟได้อย่างต่อเนื่อง ช่วยยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้นและเพิ่มความคุ้มค่า เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซ่อมหรือซื้อใหม่

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ถือเป็นหน่วยงานหนึ่งที่มีหน้าที่จำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า โดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ซึ่งในปี 2563 พบว่ามีหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายติดตั้งใช้งาน รวมทั้งสิ้น 668,469 เครื่อง ตามรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1-1 จำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ติดตั้งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

พื้นที่	รวมหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้ง (เครื่อง)
เขตภาคเหนือ	144,097
เขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	164,450
เขตภาคกลาง	216,305
เขตภาคใต้	143,617
รวม	668,469

หมายเหตุ. ปรับปรุงจากข้อมูลระบบ GIS ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

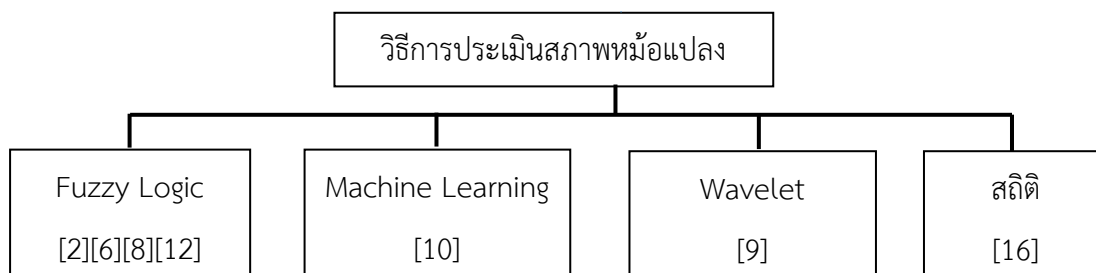
จากตารางที่ 1-1 แสดงให้เห็นได้ว่าการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) หรือการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า วิเคราะห์สาเหตุของการเสื่อมสภาพ และแนวทางการแก้ไขให้หม้อแปลงไฟฟ้ากลับมาใช้งานได้มีประสิทธิภาพ มีความสำคัญต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เพื่อสามารถรับและจ่ายไฟได้อย่างต่อเนื่อง ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม เพิ่มคุณภาพการให้บริการพลังงานไฟฟ้า ซึ่งขณะนี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวงจรรอบปีละ 1 ครั้งโดยประมาณ โดยไม่มีระบบหรือวิธีการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับจัดแผนงานก่อนเข้าบำรุงรักษา อีกทั้งการบำรุงรักษาในลักษณะวงจรรอบ อาจส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าชำรุดก่อนเข้าดำเนินการตรวจสอบครั้งถัดไป

## 1.2 การทบทวนวรรณกรรม

สำหรับเนื้อหาในหัวข้อการทบทวนวรรณกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อได้แก่ เครื่องมือหรือวิธีการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าดัชนีสุขภาพ (Health Index) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1.2.1 เครื่องมือหรือวิธีการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

วิธีการตัดสินใจที่สามารถระบุถึงสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการทดสอบหรือเก็บข้อมูลจากผลที่ได้จากการบำรุงรักษา ซ่อมแซม สามารถแยกวิธีการได้ดังภาพประกอบ 1-2



ภาพประกอบ 1-2 วิธีการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 1-2 วิธีที่ใช้ในการประเมินหรือจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่ศึกษามีด้วยกันทั้งสิ้น 4 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีสามารถประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าได้แตกต่างกัน กล่าวคือ วิธี Fuzzy Logic ทำการประเมินสภาพหรือกำหนดกลุ่มของสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยจากสร้างเส้นความเป็นสมาชิกของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมิน และใช้กฎทางฟัซซี เพื่อหาค่าเอาต์พุตหรือกลุ่มสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการกำหนดจำนวนกลุ่มของสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถกำหนดได้จากจำนวนของกลุ่มของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละปัจจัย และจำนวนของกลุ่มเอาต์พุต เนื่องจากการกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกไม่มีข้อกำหนดที่ชัดเจน การทดสอบความถูกต้องของการประเมินจึงต้องอาศัยการเปรียบเทียบกับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริง วิธี Machine Learning สามารถจำแนกกลุ่มของสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าได้รวดเร็ว และสามารถสร้างระบบการเรียนรู้สำหรับจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของข้อมูลใหม่ได้ ความถูกต้องของการจำแนกสภาพจึงขึ้นกับการใช้กลุ่มตัวอย่างที่มีการครอบคลุมสภาพต่าง ๆ รวมถึงการวิเคราะห์ตัวแปรและสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จำแนกได้อย่างเหมาะสม วิธี Wavelet จะมีวิธีการจำแนกในลักษณะการศึกษาพฤติกรรมของค่ากระแส และแรงดัน ซึ่งมีการวัดค่าตลอดเวลา และวิธีทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS ตามระดับความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง

บทความ [2] ดัชนีวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสำหรับบำรุงรักษาเชิงป้องกันของการไฟฟ้านครหลวงโดยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบตรรกะคลุมเครือ

เป็นวิธีการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการถ่วงน้ำหนักความสำคัญ  
ของปัจจัยที่มีความเสี่ยง ที่หามาจากการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytic Hierarchy  
Process : FAHP) ที่เป็นเครื่องมือช่วยตัดสินใจภายในความไม่แน่นอนของข้อมูล เพื่อนำไปคำนวณหา  
ค่าดัชนีวิเคราะห์ความเสี่ยงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.)  
วิธีการนี้เป็นการนำเอาแนวคิดของทฤษฎีความคลุมเครือ (Fuzzy Set Theory) มาใช้ในกระบวนการ  
ตัดสินใจ ซึ่งมีการเปรียบเทียบปัจจัยเป็นคู่ ๆ และประเมินเป็นชุดตัวเลข แทนการประเมินตัวเลขเพียง  
ตัวเลขเดียว โดยมีการหาลำดับความสำคัญ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การเปรียบเทียบปัจจัยรายคู่ที่กำหนดในตารางเมตริกซ์ (Fuzzy Pairwise  
Comparison Matrix)

2) การกำหนดตาราง Normalized Matrix จากสมการ

$$N_{ij} = \left[ \frac{l_{ij}}{\sum_{i=1}^n u_{ij}}, \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^n l_{ij}} \right]$$

โดยที่  $l, m, u$  = ตัวเลขความคลุมเครือเชิงสามเหลี่ยม

$ij$  = ตำแหน่งแถว คอลัมน์

3) การหาค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย  $\bar{w}_i$  จากสมการ

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n N_{ij}}{n} = (l_i, m_i, u_i)$$

$$\bar{w}_i = \frac{l_i + 4m_i + u_i}{6}$$

จากนั้น สามารถนำมาหาค่าดัชนีสุขภาพ (Health Index) ได้จากสมการ

$$HI = \frac{\sum_{j=1}^n K_j HIF_j}{HIF_{\max} \sum_{j=1}^n K_j}$$

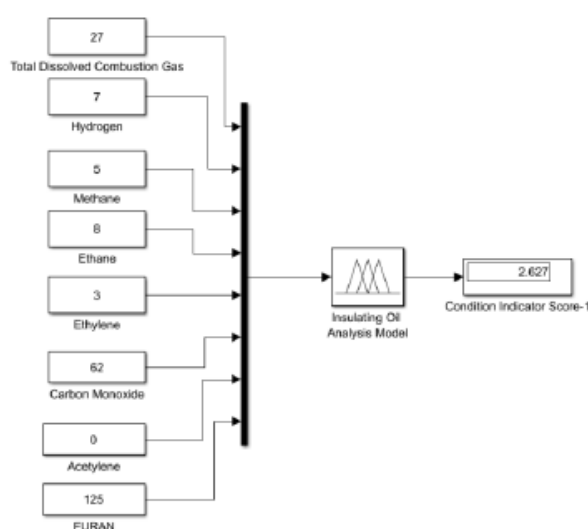
โดยที่  $HIF_j$  = ค่าดัชนีสุขภาพที่ปัจจัย  $j$

$K_j$  = ค่า Factor ของปัจจัย  $j$

ผลที่ได้พบว่าจากการนำข้อมูลผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจำนวน  
15 เครื่อง สามารถคำนวณค่าดัชนีสุขภาพได้สอดคล้องกับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า  
ของการไฟฟ้านครหลวง

บทความ [6] A Novel Fuzzy Based Technique For Transformer Health Index Computation

ได้นำเสนอการใช้เทคนิคแบบฟัซซีสำหรับหาค่าดัชนีสุขภาพ (Health Index : HI) เป็นวิธีการแก้ไขปัญหาในการคำนวณดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นดั้งเดิม ที่ใช้ผู้เชี่ยวชาญในการประเมิน ซึ่งมีผลทำให้เกิดความคลุมเครือหรือไม่ชัดเจนในบางกรณี จนไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่นอนได้ ประกอบกับต้องอาศัยการประเมินจากประสบการณ์ผู้เชี่ยวชาญที่มีความแตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้ใช้การกำหนดเกณฑ์ดัชนีสุขภาพ แบบใหม่ ซึ่งใช้วิธีตรรกะคลุมเครือ ตามการเลือกการทดสอบวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดและขจัดความต้องการผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งการคำนวณดัชนีสุขภาพ ขึ้นอยู่กับการพิจารณาปัจจัยที่จำเป็นแต่ละอย่างโดยใช้ตรรกะคลุมเครือในการคำนวณ Condition Indicator Score (CIS) เช่น การหา CIS ของค่าฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ตามภาพประกอบ 1-3



ภาพประกอบ 1-3 การหา CIS ของค่าฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า [6]

จากนั้นจึงนำคะแนนเหล่านี้มาถ่วงน้ำหนักและรวมเป็นค่า HI ของหม้อแปลงไฟฟ้าจากสมการ

$$HI = PHI - \sum (\text{individual Adjustments})$$

$$PHI = \sum_{i=0}^n CIS_i WF_i$$

โดยที่  $n$  = จำนวนปัจจัยที่พิจารณา

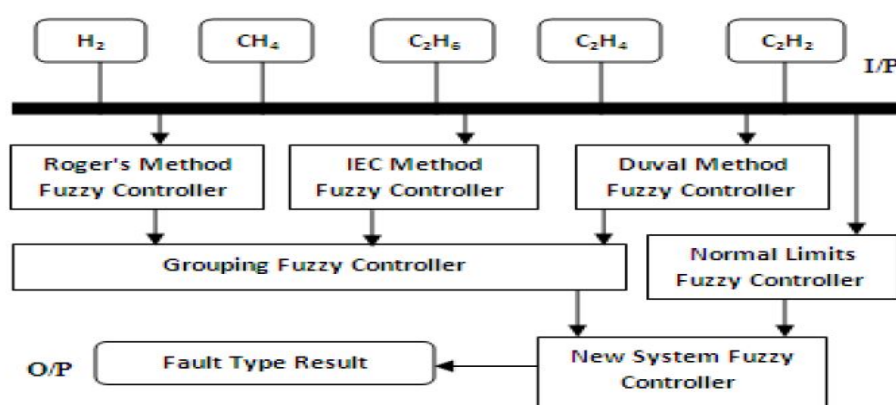
$CIS_i$  = ค่า Condition Indicator Score (CIS) ในปัจจัยที่  $i$

$WF_i$  = ค่าถ่วงน้ำหนักในปัจจัยที่  $i$

$PHI$  = ค่าผลประเมินสภาพหม้อแปลงก่อนนำไปคำนวณหา  
ดัชนีสุขภาพ

บทความ [8] Power Transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic  
Technique Based on Dissolved Gas Analysis

ได้นำเสนอการวินิจฉัยการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค Fuzzy Logic สำหรับจากตัดสินใจสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์การละลายของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการละลายของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นวิธีการวินิจฉัยความชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากมีความละเอียดอ่อนและเชื่อถือได้ ในการตรวจจับสถานะความผิดปกติเบื้องต้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าน้ำมัน โดยวิธีการแบบเดิมนี้อาจไม่สามารถวินิจฉัยได้ในกรณีที่มีข้อบกพร่องมากกว่าหนึ่งประเภทในเวลาเดียวกันบทความนี้ เสนอเทคนิคที่นำเสนอการรวมกันของ 3 วิธีที่มีการประเมินแตกต่างกัน ให้ออกมาเป็นรูปแบบการวินิจฉัยเดี่ยว ได้แก่ Rogers, IEC และ Duval โดยการรวมฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzy ทั้ง 3 วิธี ออกมาเป็นฟuzzy ขั้นสุดท้ายใหม่ตามภาพประกอบ 1-4



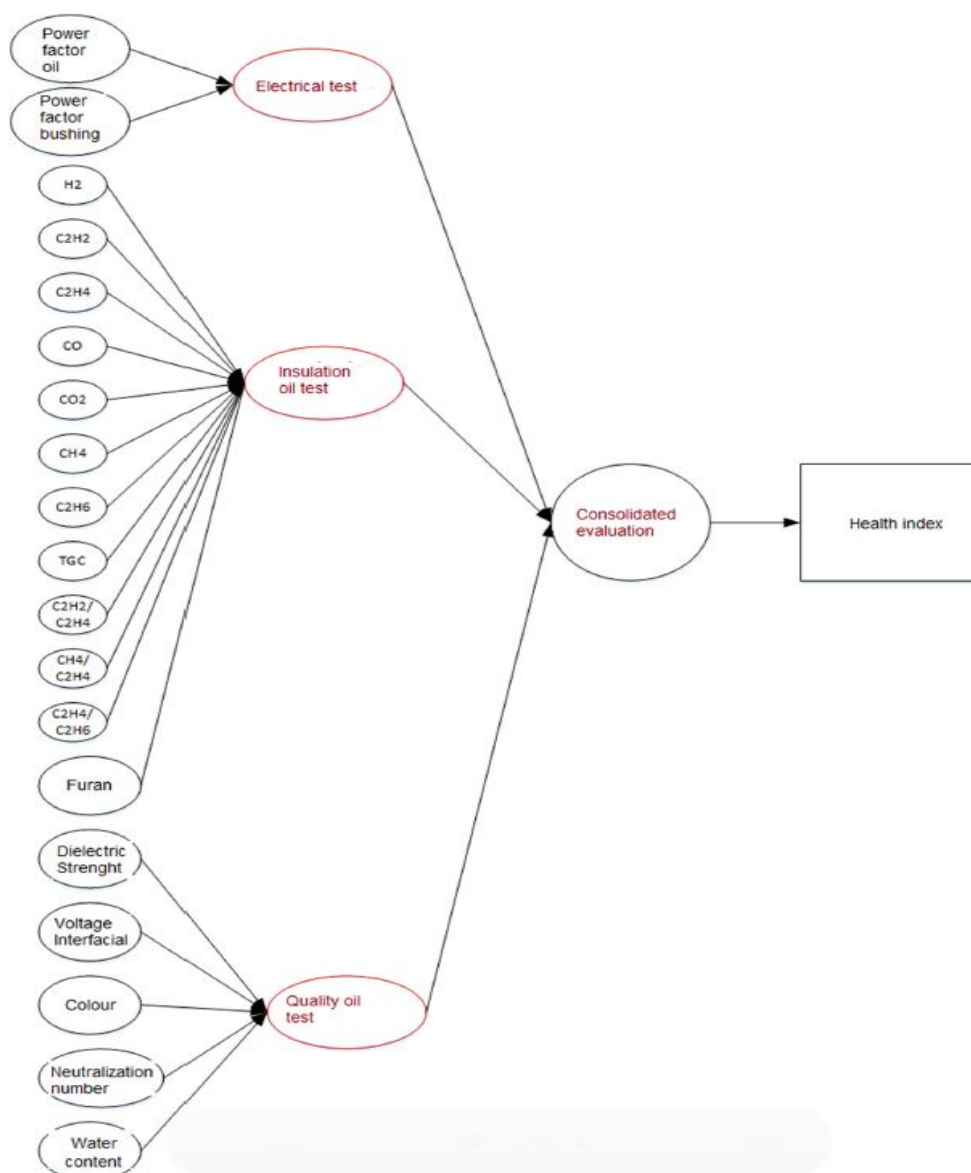
ภาพประกอบ 1-4 การออกแบบการรวมฟuzzyลอจิก [8]

ผลที่ได้พบว่า วิธีใหม่นี้ได้พัฒนาให้ระบบการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าหรือการตัดสินใจเกี่ยวกับสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าความเที่ยงตรงมากกว่าวิธี Rogers, IEC และ Duval ซึ่งมีค่าความเที่ยงตรงอยู่ที่ 89%, 84%, 84% และ 72% ตามลำดับ

บทความ [9] Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers

ได้นำเสนอการสร้างองค์ความรู้ เพื่อป้องกันการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการประเมินสภาพโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจำนวน 60 เครื่อง และการทดสอบ

ไฟฟ้าจำนวน 10,198 รายการ เพื่อนำเสนอวิธีการใหม่ในการประเมินเงื่อนไขต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีดัชนีสุขภาพ ที่พัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งได้รับการปรับปรุงจากวิธีดั้งเดิมด้วยการใช้ orthogonal Wavelet network ซึ่งเป็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ ข้อมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์จำเป็นต้องมีข้อมูลที่มีหลากหลาย ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่และการจัดเก็บข้อมูลที่ซับซ้อน วิธีการใหม่นี้ช่วยให้จัดโครงสร้างวิธีการจัดหมวดหมู่ที่เป็นประโยชน์มากขึ้น โดยการรวมปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกันไว้เป็นชุดข้อมูลการประเมินเดียวกัน นำไปสู่การสร้างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพตามภาพประกอบ 1-5



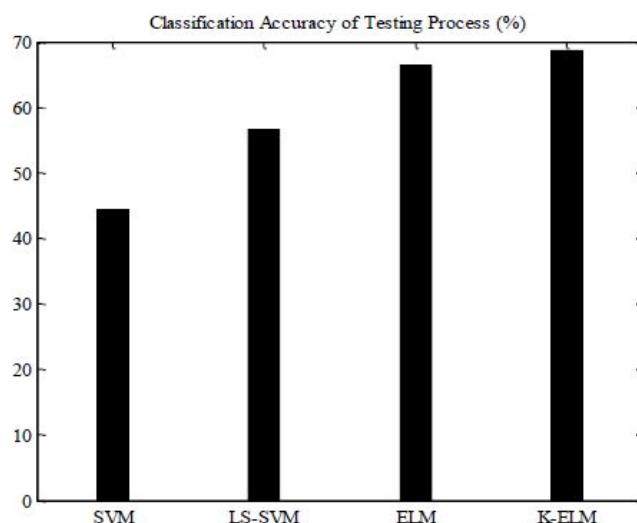
ภาพประกอบ 1-5 โครงสร้างวิธีการจัดหมวดหมู่ปัจจัยการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า [9]

ภาพประกอบ 1-5 เป็นการจัดกลุ่มปัจจัยสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ที่เป็นกลุ่มการทดสอบลักษณะเดียวกันมีความสัมพันธ์กัน โดยกลุ่มที่ 1 เป็นการทดสอบทางด้านไฟฟ้า กลุ่มที่ 2 เป็นการทดสอบค่าฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และกลุ่มที่ 3 เป็นการทดสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการจัดกลุ่มใช้การหาระยะห่างระหว่างปัจจัย (distance) กลุ่มข้อมูลที่เป็นกลุ่มลักษณะเดียวกันจะมีค่าระยะห่างน้อยกว่าปัจจัยต่างกลุ่ม นำไปสู่ผลรวมของการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

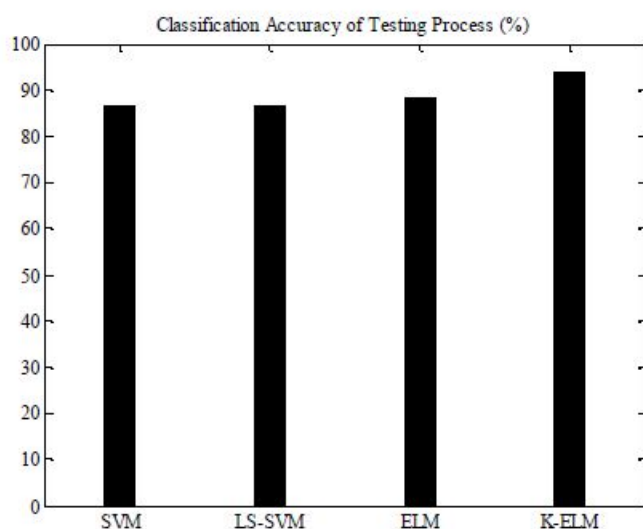
บทความ [10] Prognostics Health Management (PHM) System for Power Transformer Using Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM)

ได้นำเสนอระบบทำนายสุขภาพ (Prognostics Health Management : PHM) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยใช้ Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM) เพื่อตรวจสอบความทนทานและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ลดการใช้ผู้เชี่ยวชาญในการพิจารณาสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีชุดตัวแปรอินพุต 2 ชุด ชุดที่ 1 (set-1) ได้แก่ ปริมาณน้ำ ความเป็นกรดทั้งหมด การสลาย แรงดันไฟ ปัจจัยการกระจายก๊าซที่ติดไฟได้ที่ละลายได้ และ 2-furfuraldehyde ให้ผลลัพธ์ของระบบ PHM เป็นภาวะสุขภาพ แบ่งเป็น ภาวะดี ปานกลาง และไม่ดี ชุดตัวแปรอินพุตที่ 2 (set-2) ใช้ปริมาณน้ำ ความเป็นกรด แรงดันพังทลาย ปัจจัยการกระจาย และความตึงของส่วนต่อประสานเป็นตัวแปรอินพุต ให้ผลลัพธ์ของระบบ PHM ประกอบด้วยสี่ประเภท คือ ดี ปกติ ปานกลาง และไม่ดี โดยการเปรียบเทียบรูปแบบจากการทำ machine learning 4 รูปแบบ ได้แก่ support vector machine (SVM), least-square support vector machine (LS-SVM), extreme learning machine (ELM) และ Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM) ที่จัดได้ว่าเป็นวิธีการคำนวณที่มีความรวดเร็วในการจำแนกข้อมูล จากจำนวนหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบจำนวน 30 เครื่อง (30% test) ที่มีการระบุกลุ่มของชุดข้อมูลหรือ class ไว้แล้ว ได้ผลค่าความถูกต้องตามภาพประกอบ 1-6 และ 1-7





ภาพประกอบ 1-6 ค่าความถูกต้องของการทดสอบทั้ง 4 แบบ (set-1) [10]



ภาพประกอบ 1-7 ค่าความถูกต้องของการทดสอบทั้ง 4 แบบ (set-2) [10]

จากภาพประกอบ 1-6 และ 1-7 การจำแนกประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Kernel extreme learning machine (K-ELM) จะให้ค่าความถูกต้องและความแม่นยำมากกว่า SVM, LS-SVM และ ELM ทั้งปัจจัยการทดสอบของทั้ง set 1 ที่แยกข้อมูลของสภาพเป็น 3 ประเภท และ set 2 ที่แยกข้อมูลของสภาพเป็น 4 ประเภท รวมถึงมีการใช้เวลาในการ training น้อยกว่า ซึ่ง Extreme learning machine (ELM) เป็นวิธีใช้หลักการโครงสร้างประสาทเทียมแบบ feed-forward โดยการจับคู่ความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต เป็นการพัฒนาเพื่อแก้ไข้ปัญหาของวิธี Artificial neural network (ANN) ในเรื่องของระยะเวลาการเรียนรู้ ในการวนซ้ำในขั้นตอนการฝึกอบรมที่ต้องใช้เวลานาน เพื่อให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำ ทำให้วิธี Extreme

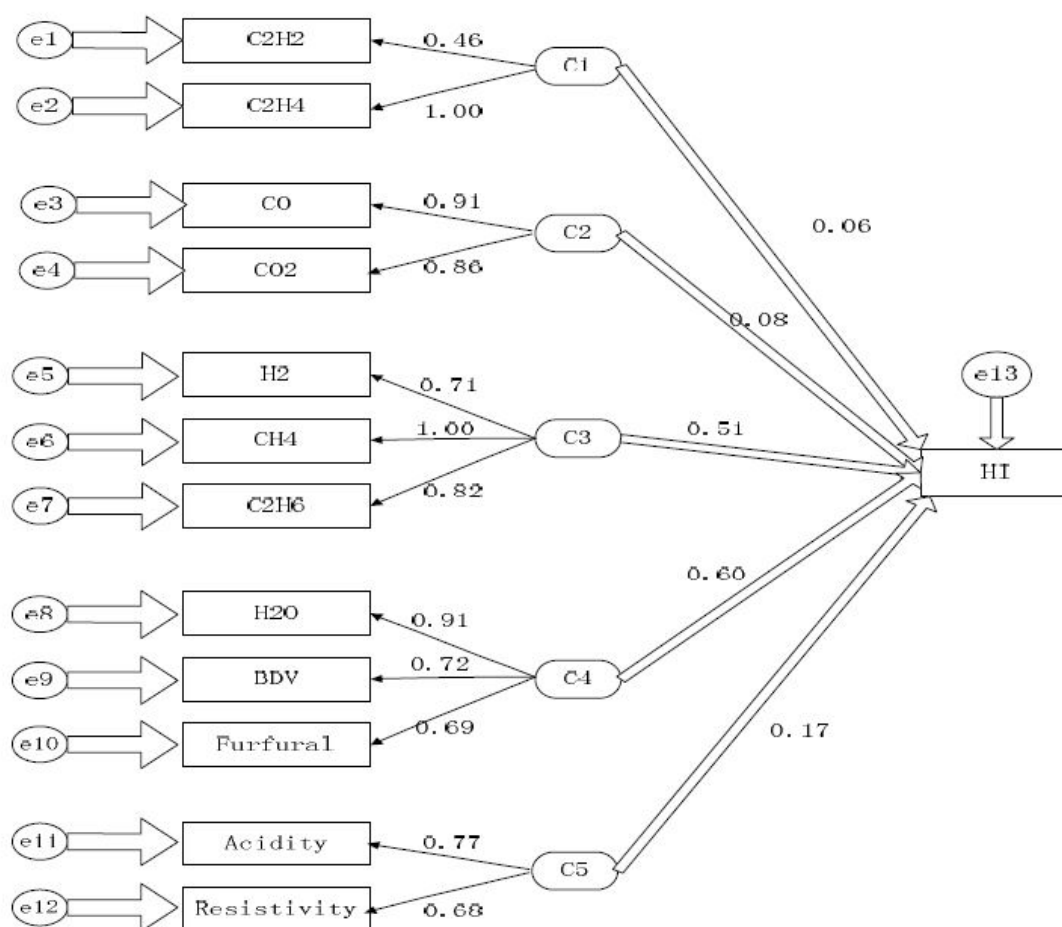
learning machine (ELM) มีความรวดเร็วมากกว่า แต่วิธี Extreme learning machine (ELM) ยังพบข้อเสียในการกำหนดค่าเซลล์ประสาทต้องใช้วิธีทดลองและหาข้อผิดพลาด (Trial and error method) และ ค่า bias จะใช้วิธีการสุ่มเลือก เพื่อแก้ไขปัญหานี้จึงได้มีการพัฒนาค่าเซลล์ประสาทในเลเยอร์จะถูกแทนที่ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล Kernel extreme learning machine (K-ELM) เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นและเสถียรภาพมากขึ้น

บทความ [12] Harmonic PMU and Fuzzy Logic for Online Detection of Short-Circuited Turns in Transformers

ได้นำเสนอการตรวจจับการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออนไลน์ โดยใช้วิธี harmonic PMU (phasor measurement unit) และตรรกะคลุมเครือ (fuzzy logic) การวินิจฉัยออนไลน์มีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้สามารถตรวจสอบการทำงานของระบบไฟฟ้าได้ตลอดเวลา เชื่อถือได้ และประหยัดโดยหลีกเลี่ยงความเสียหายและการหยุดทำงานของอุปกรณ์ บทความได้นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการวินิจฉัยข้อผิดพลาดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปข้อเสนอกำหนดสภาวะความผิดปกติผ่านสเปกตรัมของความต่างกระแส (differential current spectrum) และระบบพีซีลอจิก (fuzzy logic) สำหรับการประมาณสเปกตรัม phasor measurement unit (PMU) ถูกขยายเป็น harmonic PMU ซึ่งบอกให้รายละเอียดของขนาด (magnitude) และทิศทาง (phasor) สำหรับสัญญาณแรงดันและกระแส วิธีระบบพีซีลอจิก (fuzzy logic) จะวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่อเนื่องและออนไลน์ ในฐานะที่เป็นวิธีการที่นำเสนอมุ่งเน้นไปที่การวินิจฉัยข้อผิดพลาดออนไลน์ประสิทธิภาพได้รับการทดสอบภายใต้การทำงานที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์สภาพความผิดปกติสามารถหาได้จากความแตกต่างในปัจจุบันของ Phasor ที่เหมาะสมระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น การจำลองแสดงผลลัพธ์ตั้งแต่ฮาร์โมนิกเลขที่ 1 ถึง 7 ค่าความแตกต่างของกระแสที่วิเคราะห์เป็นครั้งแรกอยู่ที่ฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 มีแนวโน้มที่ชัดเจน ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความรุนแรงของข้อบกพร่อง (1 ถึง 5%)

บทความ [16] The New Developed Health Index for Power Transformer Condition Assessment

ได้นำเสนอดัชนีสุขภาพที่พัฒนาขึ้นใหม่สำหรับพลังงานการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ามีการเสนอวิธีดัชนีสุขภาพที่พัฒนาขึ้นใหม่ โดยการรวมผลการทดสอบต่างๆ เพื่อประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า จากเครื่องมือทางสถิติ SPSS จำนวน 87 กลุ่มตัวอย่าง วิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้า และความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการมีส่วนร่วมของศึกษาค่าดัชนีสุขภาพโดยรวมจากปัจจัยจำนวน 12 ปัจจัย ตามภาพประกอบ 1-8



ภาพประกอบ 1-8 ค่าความสัมพันธ์แต่ละปัจจัยของการประเมินสภาพหม้อแปลง [16]

จากภาพประกอบ 1-8 C4 มีค่าความสัมพันธ์ต่อดัชนีสุขภาพมากที่สุด อยู่ที่ระดับ 0.60 ซึ่ง C4 มีค่าการทดสอบการปะปนของน้ำ และการทดสอบ Furfural เป็นความสัมพันธ์เชิงบวก และค่าการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นความสัมพันธ์เชิงลบ ซึ่งจากปัจจัยทั้ง 12 ปัจจัยสามารถจำแนกดัชนีสุขภาพได้ 5 ประเภท ได้แก่ ดี ยอมรับได้ ระวัง แย่ เย่มาก ตามระดับความสัมพันธ์ของ แต่ละปัจจัย

บทความ [18] The New Developed Health Index for Transformer Condition Assessment

ได้นำเสนอดัชนีสุขภาพพัฒนาใหม่สำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการลดและรวมปัจจัยจาก 24 ปัจจัย มาเป็น 15 ปัจจัย โดยการตัดปัจจัยการทดสอบ Furan ออกจากการคำนวณ เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อนในการทดสอบ และรวมการตรวจสอบสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าย่อย ๆ จำนวน 9 ปัจจัย ที่มีน้ำหนักน้อยมาเป็น

ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าเพียง 1 ปัจจัยและปรับปรุงค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยใหม่ และดำเนินการทดสอบหม้อแปลงจำนวน 15 เครื่อง พบว่ามีความผิดพลาด 7% จากการใช้ 24 ปัจจัย โดยใช้สมการการคำนวณดังนี้

$$HI = F_1 \frac{\sum_{i=1}^{n-3} c_i DI_i}{\sum_{i=1}^{n-3} 4c_i} + F_2 \frac{\sum_{i=n-3}^n c_i DI_i}{\sum_{i=n-3}^n 4c_i}$$

โดยที่  $F_1, F_2$  = ค่าน้ำหนักของ Load tap changer และ Power transformer ตามลำดับ

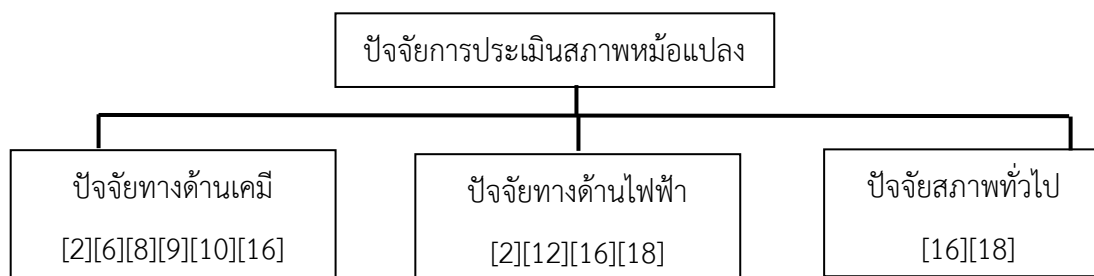
$DI_i$  = ค่าดัชนีจากการตรวจสอบหรือข้อมูลการบำรุงรักษา

$c_i$  = การประเมินเกณฑ์ของแต่ละองค์ประกอบหรือปัจจัยการประเมิน

$n$  = จำนวนลำดับขององค์ประกอบหรือปัจจัยการประเมิน

### 1.2.2 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

จากการศึกษาสามารถจำแนกปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าใหญ่ ๆ ได้ 3 ปัจจัย ดังนี้



ภาพประกอบ 1-9 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 1-9 ปัจจัยที่นำมาใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าอันดับแรกเป็นปัจจัยทางด้านเคมี เช่น การทดสอบการละลายก๊าซในน้ำมัน การทดสอบค่าความเป็นกรด การทดสอบการปะปนของน้ำ ซึ่งเป็นการทดสอบที่ตัวน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า รองลงมาเป็นปัจจัยด้านไฟฟ้า เช่น การรับภาระโหลด ค่าฮาร์โมนิก อัตราส่วนขดลวด ค่าฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

### 1.2.3 ค่าดัชนีสุขภาพ (Health Index)

การกำหนดระดับค่าดัชนีสุขภาพจะกำหนดเป็นระดับ 0 -100 โดยส่วนใหญ่จะกำหนดจากค่าช่วงของสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีระดับค่าดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าตั้งแต่ 3 – 5 ระดับ การใช้ระดับสภาพมากย่อมทำให้มีความละเอียดในการประเมินสภาพได้ดีกว่า

ตารางที่ 1-2 ตารางเปรียบเทียบการทบทวนวรรณกรรม

บทความ	วิธีการประเมิน สภาพ หม้อแปลง	ปัจจัยที่ใช้ประเมิน สภาพหม้อแปลง	จุดเด่นของวิธีการ	ข้อจำกัดของวิธีการ	กลุ่มตัวอย่าง	ระดับสภาพหม้อแปลง
[2]	Fuzzy Logic	ปัจจัยเคมี, ไฟฟ้า, ทั่วไป	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถประเมินสภาพหม้อแปลงได้ครอบคลุมทุกสภาพ</li> <li>- มีการพัฒนาสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงมาโดยตลอด</li> <li>- สร้างช่วงระดับสภาพได้หลายระดับ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องทดสอบการออกแบบด้วยข้อมูลหม้อแปลงที่เกิดขึ้นจริง</li> </ul>	หม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง	3 ระดับ ประกอบไปด้วย สภาพดี สภาพยอมรับได้ สภาพแย่
[6]		ปัจจัยเคมี				
[8]						
[12]						
[10]	Machine Learning	ปัจจัยเคมี	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความรวดเร็วในการจำแนกข้อมูล</li> <li>- มีความถูกต้องของข้อมูลสูงในช่วงที่กำหนด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการทดสอบขึ้นกับการใช้กลุ่มหม้อแปลงตัวอย่าง</li> <li>- ต้องเป็นข้อมูลที่มีความหลากหลาย</li> <li>- การวิเคราะห์ตัวแปรที่เหมาะสม</li> </ul>	3-4 ระดับ ประกอบไปด้วย สภาพดี สภาพปกติ สภาพยอมรับได้ สภาพแย่	

ตารางที่ 1-2 ตารางเปรียบเทียบการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

บทความ	วิธีการประเมิน สภาพ หม้อ แปลง	ปัจจัยที่ใช้ประเมิน สภาพหม้อแปลง	จุดเด่นของวิธีการ	ข้อจำกัดของวิธีการ	กลุ่มตัวอย่าง	ระดับสภาพหม้อแปลง
[9]	Wavelet	ปัจจัยเคมี, ไฟฟ้า	- เป็นวิธีการที่มีความแม่นยำสูง	- จำเป็นต้องเป็นข้อมูลที่มีความหลากหลาย - ใช้เวลาสร้างระบบค่อนข้างมาก	หม้อแปลง ไฟฟ้ากำลัง	5 ระดับ ประกอบไปด้วย สภาพดีมาก สภาพดี สภาพปานกลาง สภาพแย่มาก สภาพแย่มาก
[16]	สถิติ	ปัจจัยเคมี, ไฟฟ้า, ทั่วไป	- เข้าใจง่าย - มีความรวดเร็วในการจำแนกข้อมูล - สามารถอธิบายอิทธิพลของแต่ละปัจจัยได้	- ต้องที่จำนวนกลุ่มตัวอย่างมากพออธิบายประชากร - สามารถใช้ได้กับประชากรของกลุ่มตัวอย่าง		5 ระดับ ประกอบไปด้วย สภาพดี สภาพยอมรับได้ สภาพเฝ้าระวัง สภาพแย่มาก สภาพแย่มาก

### 1.3 ประเด็นการวิจัย

การสรุปประเด็นของงานวิจัยก่อนหน้าและช่องว่างของการวิจัย (Research Gap) จากการศึกษา พบว่ามีวิธีการประเมินสภาพของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าหลายวิธี ซึ่งส่วนมากเป็นการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่เป็นลักษณะหม้อแปลงที่มีการรับโหลดจำนวนมาก ติดตั้งในสถานีไฟฟ้า มีจำนวนการติดตั้งใช้งานน้อยแต่มีมูลค่าสูง มีระบบวัดค่าต่าง ๆ เช่น แรงดัน กระแส เฟสเซอร์ ไดอะแกรม จำนวนฟ้าผ่า เป็นต้น และอุปกรณ์ป้องกันจำนวนมาก และใช้ปัจจัยด้านเคมีเป็นหลัก ผู้วิจัยได้เห็นถึงความสำคัญของการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่มีผู้วิจัยน้อย ซึ่งเป็นลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการรับโหลดน้อยกว่าหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ไม่มีสำหรับวัดค่าต่าง ๆ และอุปกรณ์ป้องกันน้อย ประกอบกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นหน่วยงานที่มีการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทนี้เป็นจำนวนมาก สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบและบำรุงรักษามาใช้เป็นข้อมูลหรือปัจจัยในการประเมินสภาพโดยรวมได้ อาทิเช่น ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจัยด้านอายุ ปัจจัยด้านการรับภาระโหลด ปัจจัยด้านความเป็นฉนวนของขดลวด ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอก เป็นต้น ซึ่งการออกแบบระบบประเมินสภาพกลุ่มหม้อแปลงไฟฟ้า 33 kV ที่มีผู้ศึกษาน้อยต้องอาศัยวิธีที่ทดสอบความถูกต้องของระบบจากข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าจริง และสามารถอธิบายสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าได้หลายช่วง เพื่อให้เกิดความละเอียดของสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองแบ่งประเภทของสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าเบื้องต้นจากข้อมูลผลการทดสอบและบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ที่รวบรวมได้จำนวน 60 เครื่อง พบว่า การใช้วิธี machine learning (K-mean) จำนวนแบ่งกลุ่มสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 3 กลุ่ม และการใช้ฟัซซีลอจิกร่วมกับการคำนวณดัชนีสุขภาพ (HI) สามารถแบ่งสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าออกได้ 4 กลุ่ม ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีการตัดสินใจแบบตรรกะคลุมเครือ (fuzzy logic) ซึ่งเป็นวิธีที่มีการพัฒนาสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า และสามารถแบ่งกลุ่มสภาพได้มากกว่าแบบ machine learning มาใช้ประเมินสภาพหม้อแปลงระบบจำหน่าย 33 kV ซึ่งผลจากการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้านอกจากช่วยลดจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าชำรุดแล้ว ยังสามารถนำมาวางแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ต่อไปได้อีกด้วย

### 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ด้วยดัชนีสุขภาพ (Health Index) โดยการประยุกต์ฟัซซีลอจิก



### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV
2. สามารถนำผลจากการประเมินสภาพมาใช้อ้างอิงวางแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance)
3. สามารถลดโอกาสเกิดการชำรุด/เสียหายรุนแรงของหม้อแปลงไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า

### 1.6 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ด้วยดัชนีสุขภาพ (Health Index) โดยการประยุกต์ฟัซซีลอจิก

### 1.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV สามารถดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

1. เริ่มต้นจากการศึกษาวิธีการและปัจจัยที่สามารถนำมาใช้ประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า
2. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลง เช่น ผลการทดสอบค่าน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น
3. กำหนดปัจจัยที่ใช้สำหรับประเมินจากข้อมูลที่ได้จากการรวบรวม ซึ่งประกอบไปด้วย ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจัยด้านอายุ ปัจจัยด้านการรับภาระโหลด ปัจจัยด้านความเป็นฉนวนของขดลวด ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอก และกำหนดวิธีการตัดสินใจสภาพด้วยการใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic)
4. สร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ประเมิน ทั้งตัวแปรอินพุต และเอาต์พุต เพื่อหาค่า PHI
5. กำหนดน้ำหนักของแต่ละปัจจัย แล้วนำไปคำนวณกับค่า PHI เพื่อหาค่า HI ที่กำหนดระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า
6. ทำการทดสอบสภาพที่ได้จากระบบประเมินกับข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าจริง หากมีค่าผิดพลาดให้ทำการปรับค่าน้ำหนักหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิก



## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ด้วยดัชนีสุขภาพ (Health Index) โดยการใช้วิธีตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ ซึ่งมีแนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า
  - 2.2 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
  - 2.3 แนวคิดเกี่ยวกับปัจจัยประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า
  - 2.4 แนวคิดเกี่ยวกับดัชนีสุขภาพ (Health Index) ของหม้อแปลงไฟฟ้า
  - 2.5 แนวคิด ทฤษฎี เกี่ยวกับตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic)
  - 2.6 แนวคิด ทฤษฎี เกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANN)
  - 2.7 แนวคิดเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- จากการศึกษาผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งสรุปประเด็นของทฤษฎีต่าง ๆ ไว้ดังนี้

#### 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า หมายถึง อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าสลับให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าสลับให้มีค่าสูงต่ำได้ตามต้องการ หรือใช้สำหรับแยกวงจรทางไฟฟ้า ซึ่งถือได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการรักษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือได้



ภาพประกอบ 2-1 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

หม้อแปลงไฟฟ้ามีหลักการทำงานอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กในการสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำให้กับตัวนำ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำ ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ ซึ่งกระแสที่ป้อนของไฟฟ้ากระแสสลับมีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปมา ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตัดผ่านตัวนำ ก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำ โดยขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและความเร็วในการตัดผ่านตัวนำของสนามแม่เหล็ก โดยโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบไปด้วยขดลวด 2 ขดพันรอบแกนที่เป็นเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งแกนอาจเป็นแกนเหล็ก หรือแกนอากาศ หรือแกนอื่น ๆ ที่สามารถเป็นเส้นทางได้ ขดลวดที่มีหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าหรือขดลวดด้านเข้า เรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดที่จ่ายกระแสออกหรือขดลวดด้านออก เรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding)

โดยหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีใช้งานสามารถแบ่งตามประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ 3 แบบ ดังนี้

- 1) แบ่งตามขนาดแรงดันไฟฟ้า สามารถแบ่งหม้อแปลงไฟฟ้าได้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าระบบแรงดัน 33 kV หม้อแปลงไฟฟ้าระบบแรงดัน 22 kV และหม้อแปลงไฟฟ้าระบบแรงดัน 19 kV
- 2) แบ่งตามจำนวนเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าประเภท 3 เฟส มี 6 ขนาดพิกัด ได้แก่ 50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA, 315 kVA, 400 kVA และหม้อแปลงไฟฟ้าประเภท 1 เฟส มี 4 ขนาดพิกัด ได้แก่ 10 kVA, 20 kVA, 30 kVA, 50 kVA ตามภาพประกอบ 2-3 และ 2-4



ภาพประกอบ 2-2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ภาพประกอบ 2-3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3) แบ่งตามโครงสร้างตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปิดผนึกถาวร (Hermetically Sealed Type) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีถังอะไหล่ลมน้ำมันหม้อแปลง (Conservator Type)



ภาพประกอบ 2-4 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปิดผนึกถาวรของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ภาพประกอบ 2-5 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีถังอะไหล่ลมน้ำมันหม้อแปลงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีการใช้งานไประยะหนึ่ง ย่อมทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ หรือส่วนประกอบต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ชำรุดหรือ ล้มเหลวได้ และส่งผลกระทบต่อการทำงานโดยรวมของระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อเกิดเหตุการณ์ หม้อแปลงไฟฟ้าชำรุดอย่างรุนแรง ย่อมส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าดับตามมา จึงต้องรีบแก้ไขให้ระบบ ไฟฟ้ากลับคืนสู่สถานะจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ตามปกติโดยเร็วที่สุด ซึ่งเป็นการบำรุงรักษาระบบจำหน่าย ไฟฟ้าแบบแก้ไข ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมค่อนข้างนาน เกิดความเสียหายสูง เนื่องจากการ บำรุงรักษารูปแบบนี้ไม่ได้มีการวางแผนล่วงหน้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ จำหน่ายไฟฟ้าลดลงได้ โดยการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถประเมิน ได้ดังนี้

1) การตรวจสอบและวิเคราะห์จากฉนวนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นการทดสอบหา ค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC หรือ IEEE หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งาน มาเป็นระยะเวลานานความชื้นที่เข้าไปในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะสะสมอยู่ที่น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า หรือส่วนที่เป็นฉนวนต่าง ๆ ทำให้น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าความเป็นฉนวนลดลง จนในที่สุดจะเกิด การลัดวงจรภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าชำรุดได้

2) การทดสอบสภาพฉนวน และกระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูงเป็นการทดสอบ ความสมบูรณ์ขดลวด และฉนวน Bushing ภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า

3) ประวัติการบำรุงรักษา และลักษณะการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ละเครื่องมีการติดตั้งใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลให้เกิดการบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน ด้วย

4) อายุของหม้อแปลงไฟฟ้า การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเวลานานจะทำให้เกิด การเสื่อมสภาพของส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ขดลวด ตัวถัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งฉนวนกระดาษที่อยู่บริเวณขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถบำรุงรักษาตามปกติได้ รวมถึงหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอายุการใช้งานที่นานย่อมส่งผลให้เกิดต้นทุนในการบำรุงรักษาที่เพิ่มสูงขึ้น ได้

## 2.2 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดให้มีการ บำรุงรักษาอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง โดยมีขั้นตอนการบำรุงรักษาไว้ 21 ขั้นตอน<sup>[1]</sup> ดังนี้

1) ตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูง-แรงต่ำ แรงสูง-กราวด์ และ แรงต่ำ-กราวด์ และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา

- 2) ตรวจสอบสารดูดความชื้น Silica-gel ถ้าเสื่อมสภาพเกิน 2 ใน 3 ส่วนให้เปลี่ยนใหม่ และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 3) ตรวจสอบขั้วต่อสายแรงสูง-แรงต่ำ (ทำความสะอาด/ขันสลักเกลียว) และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 4) ตรวจสอบซีลยาง/ปะเก็น และยางฝาถังหม้อแปลง หากมีน้ำมันซึมให้เปลี่ยน และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 5) ตรวจสอบสภาพภายนอก ครีประบายความร้อน และสภาพการติดตั้งหม้อแปลง และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 6) ตรวจสอบสภาพบุชชิ่งแรงสูง-แรงต่ำ ทำความสะอาด และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 7) ตรวจสอบระดับน้ำมันในถังอะไหล่ ถ้าต่ำกว่าระดับให้เติมให้อยู่ในระดับมาตรฐาน การตรวจระดับน้ำมันของหม้อแปลงให้ทำการเปิด Hand Hole ที่อยู่บนฝาถังหม้อแปลงและดูระดับน้ำมันภายในตัวถังหม้อแปลง หากระดับน้ำมันต่ำกว่าบุชชิ่งแรงต่ำต้องเติมน้ำมันให้อยู่เหนือบุชชิ่งแรงต่ำ และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 8) ตรวจสอบจุดต่อสายดินและสายนิวตรอนต้องสมบูรณ์และแน่น
- 9) ตรวจสอบ Tap ของหม้อแปลงว่าขณะทำการบำรุงรักษา และบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 10) ตรวจสอบค่าความต้านทานดินที่ต้นหม้อแปลงและต้นถัดไป พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 11) ตรวจสอบสภาพล่อฟ้าแรงสูง-แรงต่ำ ถ้าชำรุดให้เปลี่ยน (กรณีแรงสูงถ้าไม่ได้ดับไฟทั้งไลน์ให้บันทึกลงในรายงานการบำรุงรักษาถ้าเป็นแรงต่ำให้ดำเนินการเปลี่ยน) พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 12) ตรวจสอบสภาพ Drop - out Fuse Cutout พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 13) ตรวจสอบขนาดฟิวส์แรงสูง-แรงต่ำ ถ้าชำรุดหรือไม่ได้มาตรฐานให้เปลี่ยน พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 14) วัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงที่บำรุงรักษา พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา
- 15) ตรวจสอบทำความสะอาดหน้าสัมผัส LT. Switch พร้อมขัน Clamp หรือหางปลาเข้าสาย LT. Switch ให้แน่น พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา

16) ฟัน PEA ในกรณีตัวหนังสือและหรือตัวเลขลบเลื่อน พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา

17) ตรวจสอบระยะห่างของอาร์คซึ่งฮอร์นว่าได้ระยะ บิดงอ หรือไม่ และระหว่างขั้วของอาร์คซึ่งฮอร์นให้เอียงกันเล็กน้อยเพื่อป้องกันน้ำฝนไหลย้อนทำให้เกิด Flashover (ระยะระบบ 22KV = 15.5 cm , ระบบ 33 KV = 22 cm) พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา

18) ตัดต้นไม้และเถาวัลย์บริเวณต้นหม้อแปลง

19) ตรวจสอบเสา/คาน ต้นหม้อแปลง และบันทึกสภาพลงในใบรายงานผลการบำรุงรักษา

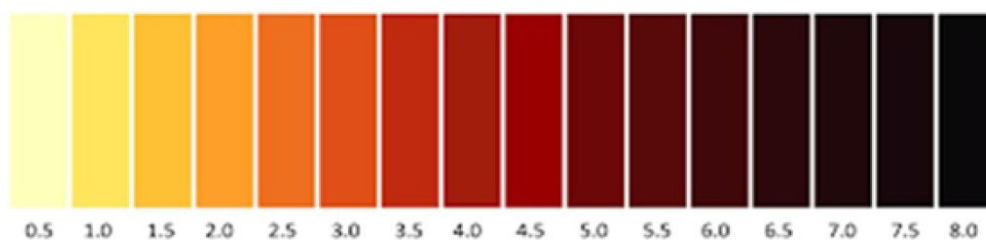
20) ตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง (นำตัวอย่างของน้ำมันหม้อแปลงมาทดสอบ) สำหรับหม้อแปลง Seal Type หากมีคราบน้ำมันหรือน้ำมันรั่วซึมให้แก้ไข ปัญหา เช่น เปลี่ยนซีลยาง หรือประเก็นใหม่ จึงทดสอบน้ำมันหม้อแปลง พร้อมบันทึกในรายงานการบำรุงรักษา

21) ดำเนินการถ่ายรูปก่อน และหลังบำรุงรักษา

## 2.3 แนวคิดเกี่ยวกับปัจจัยประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

### 2.3.1 ปัจจัยการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านการทดสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีหน้าที่เป็นการฉนวน และระบายความร้อนจากภายในหม้อแปลงไฟฟ้าออกสู่บรรยากาศภายนอก น้ำมันที่มีการเป็นฉนวนที่ดีจะต้องมีค่า Breakdown voltage สูง ตามมาตรฐาน ไม่เกิดการรวมตัวกับความชื้นได้ง่าย ไม่ทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ที่แช่อยู่ ไม่เป็นกรด ต่าง กำมะถัน มีค่าความหนืดต่ำ ตกเป็นตะกอนได้ยาก และสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าควรเป็นสีที่ได้มาตรฐาน เนื่องจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนที่ส่งผลให้ฉนวนภายในตัวหม้อแปลงเกิดการเสื่อมสภาพและผสมในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้สีของน้ำมันมีการเปลี่ยนแปลง ตามภาพประกอบ 2-6



ภาพประกอบ 2-6 ระดับสภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งาน [15]



โดยการประเมินคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถประเมินได้ตาม [19]

ดังนี้

$$OQF = \frac{\sum_{i=1}^5 S_i \times W_i}{\sum_{i=1}^5 W_i} \quad (2-1)$$

โดยที่  $OQF$  = ปัจจัยคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil quality factor)

$S_i$  = ค่าคะแนนประเมิน

$W_i$  = ค่าน้ำหนัก

ตารางที่ 2-1 ปัจจัยการทดสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วยการทดสอบ	$S_i$	$W_i$
การทดสอบค่า ความเป็นฉนวน [ASTM D1816 : U ≤ 69 kV]	≥ 45	kV	1	3
	35 - 45		2	
	30 - 35		3	
	≤ 30		4	
ค่าแรงดึงผิว (IFT)	≥ 25	mN/m	1	2
	20 - 25		2	
	15 - 20		3	
	≤ 15		4	
ค่าความเป็นกรด (Acidity)	≤ 0.05	mg KOH/g	1	1
	0.05 - 0.1		2	
	0.1 - 0.2		3	
	≥ 0.2		4	
ค่าการผสมของน้ำ (Water content)	≤ 25	ppm	1	4
	20 - 30		2	
	30 - 40		3	
	> 40		4	

ตารางที่ 2-1 ปัจจัยการทดสอบคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

การทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วยการทดสอบ	$S_i$	$W_i$
ค่าความเข้มสี (Color)	$\leq 1.5$	เท่า	1	2
	1.5 – 2.0		2	
	2.0 – 2.5		3	
	$\geq 2.5$		4	

ค่า  $OQF$  ที่คำนวณได้จะได้รับการจัดลำดับ และระบุค่า HIF หรือค่าประเมินที่ของแต่ละปัจจัย ดังนี้

ตารางที่ 2-2 การจัดลำดับคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

$OQF$	ลำดับคุณภาพ	HIF	สภาพ
$< 1.2$	A	4	ดี
$1.2 \leq OQF < 1.5$	B	3	ยอมรับได้
$1.5 \leq OQF < 2$	C	2	ระวัง
$2 \leq OQF < 3$	D	1	แย่
$OQF \geq 3$	E	0	แย่มาก

### 2.3.2 ปัจจัยการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าทางการทดสอบสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นการตรวจสอบส่วนใหญ่เบื้องต้นด้วยสายตาจากการตรวจสอบภายนอกตามการบำรุงรักษา เช่น การตรวจสอบสภาพทั่วไป ปลอกฉนวน การรั่วซึมของน้ำมันหม้อแปลง ปริมาณน้ำมันหม้อแปลง เป็นต้น ซึ่งสามารถประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าตามจำนวนของปัจจัยของการเสื่อมสภาพจำนวน 10 ปัจจัย<sup>[19]</sup> ตามตารางที่ 2-3 และตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-3 ปัจจัยการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า

ลำดับที่	ปัจจัยการตรวจสอบสภาพภายนอก
1	การกัดกร่อนของตัวถัง
2	สภาพปลอกตัวนำ
3	ระบบกราวด์ หรือความต้านทานดิน

ตารางที่ 2-3 ปัจจัยการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

4	การรั่วซึมของน้ำมันหม้อแปลง
5	ปริมาณน้ำมันในถัง
6	สภาพซีลยาง
7	การกักความร้อนของตัวถังน้ำมันอะไหล่
8	จุดต่อตัวนำ (Connector)
9	ระบบระบายความร้อน
10	ฐานราก

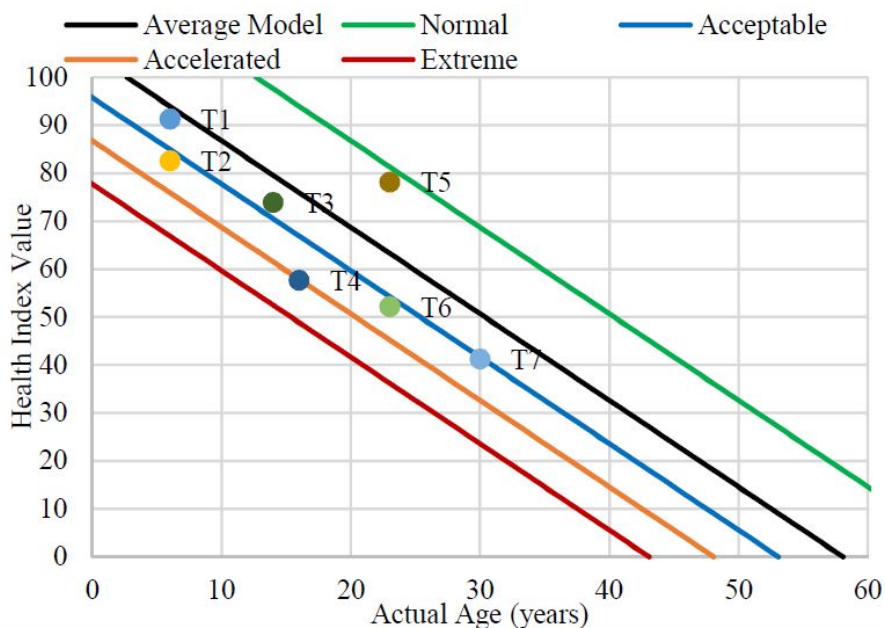
ตารางที่ 2-4 การจัดลำดับการประเมินสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า

ลำดับสภาพ	HIF	สภาพ	รายละเอียด
A	4	ดี	ทำงานปกติ
B	3	ยอมรับได้	พบการเสื่อมสภาพจำนวน 1 – 2 ปัจจัย
C	2	ระวัง	พบการเสื่อมสภาพจำนวน 3 ปัจจัย
D	1	แย่มาก	พบการเสื่อมสภาพจำนวน 4 ปัจจัย
E	0	แย่มาก	พบการเสื่อมสภาพมากกว่า 4 ปัจจัย

### 2.3.3 ปัจจัยการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีการใช้งานจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษที่พันรอบตัวนำขดลวด เพราะเป็นส่วนที่สัมผัสกับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการจ่ายโหลด ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านไปเป็นระยะเวลาานาน ๆ จะทำให้ฉนวนกระดาษเกิดการสูญเสียความแข็งแรงทางกลได้ โดยสามารถการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าตามอายุการใช้งานได้ดังนี้

[18] กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ากับอายุการใช้งานในช่วง 0 – 60 ปี เป็นไปตามภาพประกอบ 2-7



ภาพประกอบ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ากับอายุการใช้งาน [18]

[5] กำหนดการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าตามอายุการใช้งานด้วยการใช้ HIF เป็น 4 ระดับ ตามตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 การจัดลำดับการประเมินอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

ลำดับสภาพ	HIF	อายุการใช้งาน
A	4	น้อยกว่า 20 ปี
B	3	20 - 40 ปี
C	2	40 - 60 ปี
D	1	มากกว่า 60 ปี

### 2.3.4 ปัจจัยการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นการวัดความต้านทานของขดลวดแต่ละขด เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ระหว่างเฟสว่ามีขดลวดใดมีความผิดปกติ ซึ่งจะต้องทำการวัดค่าระหว่างขดลวดแรงสูง - ขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง - กราวด์ และขดลวดแรงต่ำ - กราวด์ หากความต้านทานมีค่าสูงย่อมส่งผลให้ลดการเกิดจากลัดวงจรระหว่างขด

หรือลัดวงจรลงกราวด์ได้ ที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดหม้อแปลงไฟฟ้าชำรุด โดยสามารถจัดลำดับการประเมินค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ตามตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 การจัดลำดับการประเมินค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า<sup>[5]</sup>

Insulation type	Insulation test (Mohm)	HI
Core to Ground	> 1000	Very Good
	100 - 1000	Good
	10 - 100	Regular
	1 - 10	Poor
	< 1	Very Poor

### 2.3.5 ปัจจัยการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

เป็นการประเมินพฤติกรรมการจ่ายโหลดหรือการจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะถูกใช้งานกับโหลดไม่เกิน 80% ของพิกัดหม้อแปลง เนื่องจากเหตุผลด้านความปลอดภัยและการรองรับการเพิ่มขึ้นของกระแสแบบทันทีทันใด ส่งผลให้อุณหภูมิขณะทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าสูงเกินไป เพราะความร้อนภายในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดจากความสูญเสียในขดลวดเป็นสาเหตุทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าสั้นลง เนื่องจากการเสื่อมสภาพของฉนวนภายใน ซึ่งสามารถประเมินการจ่ายโหลดหรือการรับภาระจากการพิจารณาการจ่ายโหลดสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า หรือการจ่ายโหลดเกินพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งภายในเดือน เทียบกับขนาดพิกัดของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการประเมินการจ่ายโหลดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2-2 <sup>[5]</sup> ดังนี้

$$N_i = \frac{S_i}{S_B} \quad (2-2)$$

โดยที่  $N_i$  = อัตราการจ่ายโหลดของเดือน  
 $S_i$  = การจ่ายโหลดสูงสุดของเดือน  
 $S_B$  = พิกัดกำลังหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 2-7 การประเมินการจ่ายโหลด

$N_i$	$i$
$N_i < 0.6$	0
$0.6 \leq N_i < 1$	1
$1 \leq N_i < 1.3$	2
$1.3 \leq N_i < 1.5$	3
$N_i \geq 1.5$	4

ค่า  $i$  ที่ได้จะนำมาคำนวณหาภาวะการรับโหลด (Load factor : LF) และนำไปจัดลำดับ และระบุค่า HIF หรือค่าประเมินที่ของปัจจัย จากสมการ 2-3 <sup>[5]</sup>

$$LF = \frac{\sum_{i=0}^4 (4-i) \times N_i}{\sum_{i=0}^4 N_i} \quad (2-3)$$

ตารางที่ 2-8 การจัดลำดับคุณภาพสภาวะการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

$LF$	ลำดับคุณภาพ	HIF
$LF < 1.2$	A	4
$2.5 \leq LF < 3.5$	B	3
$1.5 \leq LF < 2.5$	C	2
$0.5 \leq LF < 1.5$	D	1
$LF \leq 0.5$	E	0

#### 2.4 แนวคิดเกี่ยวกับดัชนีสุขภาพ (Health Index) ของหม้อแปลงไฟฟ้า

ดัชนีสุขภาพ (Health Index : HI) เป็นตัวบ่งบอกลักษณะเชิงปริมาณด้านสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยพิจารณาจากข้อมูลสนับสนุนจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ การประเมินสภาพจริง หรือข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ มาวิเคราะห์เพื่อสร้างดัชนีชี้วัดเชิง

ปริมาณและสภาพโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อใช้วางแผนในอนาคต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2-4 [5][19]

$$HI = F_1 \frac{\sum_{i=1}^{n-3} c_i DI_i}{\sum_{i=1}^{n-3} 4c_i} + F_2 \frac{\sum_{i=n-3}^n c_i DI_i}{\sum_{i=n-3}^n 4c_i} \quad (2-4)$$

โดยที่  $F_1, F_2$  = ค่าน้ำหนักของ Load tap changer และ Power transformer ตามลำดับ

$DI_i$  = ค่าดัชนีจากการตรวจสอบหรือข้อมูลการบำรุงรักษา

$c_i$  = การประเมินเกณฑ์ของแต่ละองค์ประกอบหรือปัจจัย

การประเมิน

$n$  = จำนวนลำดับขององค์ประกอบหรือปัจจัยการประเมิน

การพัฒนาดัชนีสุขภาพมีการพัฒนาหรือการวิเคราะห์ข้อมูลที่แตกต่างกัน นำไปสู่คำจำกัดความและช่วงของการประเมินดัชนีสุขภาพที่แตกต่างกัน ดังนี้

ตารางที่ 2-9 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [6]

ค่าดัชนีสุขภาพ	ดัชนีสุขภาพ	อธิบาย
8 - 10	ดี	ดำเนินการตามปกติ
4 - 7	ยอมรับได้	ระมัดระวังและต้องมีการทดสอบและบำรุงรักษา
0 - 3	แย่มาก	ควรสับเปลี่ยน

ตารางที่ 2-10 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [18]

ค่าดัชนีสุขภาพ	ดัชนีสุขภาพ
85 - 100	ดีเยี่ยม
70 - 85	ดี
50 - 70	ระวัง
30 - 50	แย่มาก
0 - 30	แย่มาก

ตารางที่ 2-11 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [9]

ค่าดัชนีสุขภาพ	ดัชนีสุขภาพ	Requirement	อายุที่สามารถใช้งานต่อได้
100	ดีมาก	สภาพปกติ	> 15
30	ดี	บำรุงรักษาเชิงป้องกัน	5 - 15
20	ยอมรับได้	ควรพิจารณาวินิจฉัยและทดสอบ	2 - 5
10	แย่มาก	วางแผนสำหรับสับเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้า	1 - 2
0	แย่มาก	มีความเสี่ยงชำรุดสูง	< 1

ตารางที่ 2-12 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [19]

ค่าดัชนีสุขภาพ	ดัชนีสุขภาพ	อายุการใช้งานที่สามารถใช้งานต่อได้
85 - 100	ดีมาก	มากกว่า 15 ปี
70 - 85	ดี	มากกว่า 10 ปี
50 - 70	ยอมรับได้	ถึง 10 ปี
30 - 50	แย่มาก	น้อยกว่า 10 ปี
0 - 30	แย่มาก	หมดอายุการใช้งาน

ตารางที่ 2-13 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า [17]

ค่าดัชนีสุขภาพ	ดัชนีสุขภาพ	อายุการใช้งานที่สามารถใช้งานต่อได้
85 - 100	ดี	ดำเนินการตามปกติ
70 - 85	ยอมรับได้	ดำเนินการตามปกติ
50 - 70	มีสัญญาณเตือน	เฝ้าระวัง
30 - 50	แย่มาก	เฝ้าระวัง และเน้นการบำรุงรักษามากขึ้น
0 - 30	แย่มาก	บำรุงรักษาหรือสับเปลี่ยนโดยเร็วที่สุด

โดย [19] กำหนดค่าการประเมินเกณฑ์ของแต่ละองค์ประกอบหรือปัจจัยการประเมิน ( $c_i$ ) หรือ ค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัย ( $K$ ) มีค่าความตารางที่ 2-14



ตารางที่ 2-14 น้ำหนักดัชนีสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของแต่ละปัจจัย

ปัจจัย	ค่าน้ำหนัก $c_i$
การวิเคราะห์ก๊าซของน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis)	10
การรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load History)	10
ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)	10
อินฟราเรด (Infra-red)	10
คุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil Quality)	6
สภาพโดยรวม (Overall Condition)	8
การตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า (Visual Inspection)	10
อัตราส่วนของขดลวดหรือแรงดัน (Turn Ratio)	5
ค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึม (Leakage Reactance)	8
ความต้านทานขดลวด (Winding Resistance)	6
การลัดวงจร (Core-to-Ground)	2
สภาพบุชชิ่ง (Bushing Condition)	5
การวิเคราะห์ก๊าซของน้ำมันเทปหม้อแปลง (DGA of Load Tap Changers)	6
คุณภาพของน้ำมันเทปหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil Quality of Load Tap Changers)	3
สภาพรวมของเทปหม้อแปลงไฟฟ้า (Overall Load Tap Changers Condition)	5

## 2.5 แนวคิด ทฤษฎี เกี่ยวกับตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic)

ตรรกะคลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) เป็นกระบวนการหรือตรรกะทางคณิตศาสตร์ ที่สามารถนำมาใช้ตัดสินใจ เหตุการณ์ต่าง ๆ ในสถานะที่มีปัจจัยหรือข้อมูลไม่แน่นอน โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ เป็นการใช้หลักการและเหตุผลตามวิธีการคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ มีลักษณะพิเศษกว่าตรรกะแบบดั้งเดิมจริงเท็จ (Boolean logic) ซึ่งเป็นการเพิ่มเติมความคิดของมนุษย์ที่มีความยืดหยุ่นเข้ามาในการตัดสินใจเป็นความจริง (partial true) อยู่ในช่วงระหว่างจริง (completely true) กับเท็จ (completely false)<sup>[3]</sup>

### 2.5.1 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีฟัซซีเซตจะครอบคลุมทฤษฎีเซตแบบฉบับ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งในระหว่างค่านั้นจะมีเซตแบบฟัซซีด้วย ฟัซซีเซตจึงจะมีขอบเขตแบบฟัซซีที่มีลักษณะแบบไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

นิยามของฟัซซีเซต สามารถกำหนด โดยให้  $X$  เป็นเซตที่ไม่ว่าง ฟัซซีเซต  $A$  สามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (2-5)$$

เมื่อ  $\mu_A$  สามารถอธิบายความเป็นค่าของความเป็นสมาชิกภาพของตัวประกอบ  $x$  ในฟัซซีเซต  $A$  สำหรับแต่ละฟัซซีเซต สามารถเขียนเป็นเซตของคู่อันดับ (tuples) ได้ดังนี้

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (2-6)$$

เมื่อ	$A$	=	ฟัซซีเซต $A$
	$x$	=	สมาชิกของเซต (set membership)
	$\mu_A$	=	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)
	$X$	=	เอกภพสัมพัทธ์ (universe) หรือประชากร

แนวคิดฟัซซีเซตสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดของเซตแบบดั้งเดิมได้ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าของความเป็นสมาชิก (degree of membership) ซึ่งแสดงด้วยค่าตัวเลขระหว่าง 0 และ 1 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $[0, 1]$  โดยที่ 0 หมายถึงไม่เป็นสมาชิกในเซต 1 หมายถึง เป็นสมาชิกในเซต และค่าระหว่าง 0 กับ 1 เป็นสมาชิกบางส่วนในเซต เพื่อทำให้เกิดความยืดหยุ่นและความราบเรียบในการเปลี่ยนจากพื้นที่นอกเซตไปอยู่ในเซตของสมาชิกต่าง ๆ โดยมีฟังก์ชันสมาชิก (membership function) เป็นฟังก์ชันจัดเทียบ (mapping function) วัตถุในโดเมนใด ๆ ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกในฟัซซีเซตความเป็นสมาชิกสำหรับฟัซซีเซต มีจำนวนระดับความเป็นสมาชิกค่าเป็นอนันต์ หรือมีค่าความเป็นสมาชิกต่อเนื่องในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ส่งผลให้เกิดการครอบคลุมการกำหนดสมาชิกแบบฉบับ และเซตแบบฉบับหรือเซตทวินัย (crisp set)

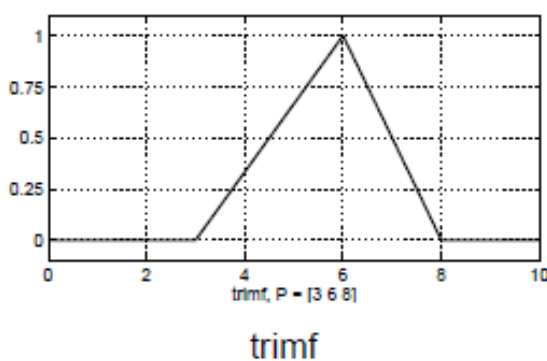
### 2.5.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)

เป็นฟังก์ชันของการตัดสินใจที่มีการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปร โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่แน่นอน และคลุมเครือ ซึ่งเป็นวิธีการที่สำคัญต่อการตัดสินใจให้ได้ค่าเอาต์พุตของความเป็นสมาชิก เพื่อนำไปใช้ในการดำเนินการฟัซซี ผ่านรูปแบบกฎของฟัซซี เพราะรูปแบบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนำไปสู่กระบวนการคิด ตัดสินใจ และแก้ไข

ปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการ โดยสามารถแยกชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปได้ 6 ชนิด<sup>[3]</sup> ดังนี้

1) ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (triangular membership function) เป็นฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ 3 ค่าคือ {a, b, c}

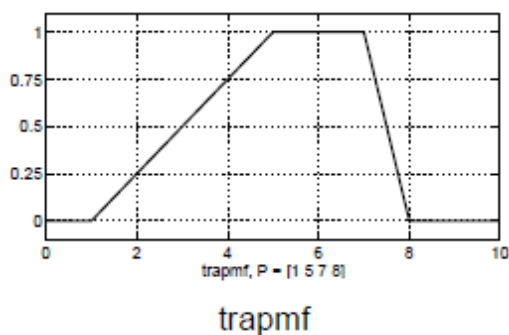
$$\text{triangular}(x: a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (2-7)$$



ภาพประกอบ 2-8 triangular membership function [3]

2) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function) เป็นฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ 4 ค่าคือ {a, b, c, d}

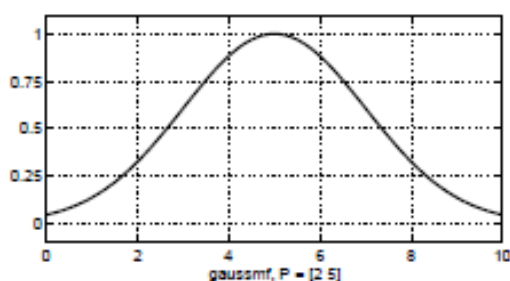
$$\text{trapezoidal}(x: a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & c \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2-8)$$



ภาพประกอบ 2-9 trapezoidal membership function [3]

3) ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function) เป็นฟังก์ชันที่มีมาพิจารณาถึงค่าเฉลี่ย ( $m$ ) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma$ ) ส่งผลให้เส้นความเป็นสมาชิกมีลักษณะโค้ง โดยมีพารามิเตอร์ 2 ค่าคือ  $\{m, \sigma\}$

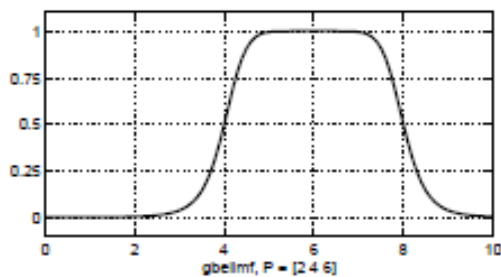
$$\text{gaussian}(x : m : \sigma) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{\sigma^2}\right) \quad (2-9)$$



ภาพประกอบ 2-10 Gaussian membership function [3]

4) ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped membership function) เป็นฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ 3 ค่าคือ  $\{a, b, c\}$

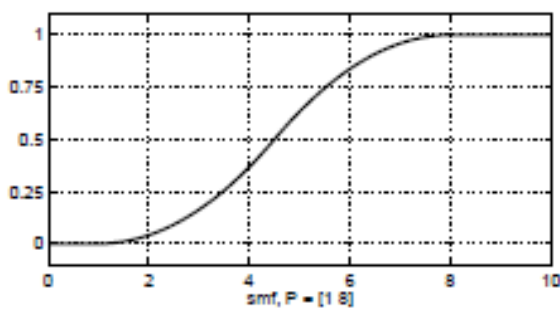
$$\text{bell-shaped}(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x - c}{a}\right|^{2b}} \quad (2-10)$$



ภาพประกอบ 2-11 Bell-shaped membership function [3]

5) ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ 2 ค่าคือ  $\{a, b\}$

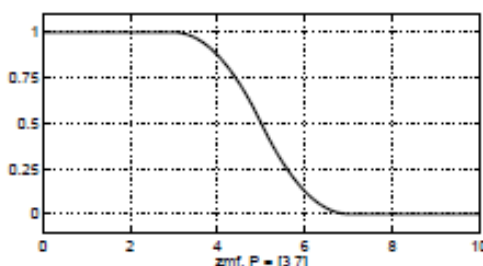
$$S(x: a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (2-11)$$



ภาพประกอบ 2-12 Smooth Membership Function [3]

6) ฟังก์ชันตัวแซด (Z-membership function) เป็นฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ 2 ค่าคือ  $\{a, b\}$

$$Z(x: a, b) = \begin{cases} 1 & x < a \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (2-12)$$



ภาพประกอบ 2-13 Z-membership function [3]

การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิก ควรเลือกตามความเหมาะสมและครอบคลุมข้อมูลที่เข้ามา โดยสามารถที่จะทำให้เกิดการทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขให้เหมาะสมกับงานที่กำลังปฏิบัติงานหรือตามความต้องการได้

### 2.5.3 ความสัมพันธ์แบบฟัชซี

ความสัมพันธ์แบบฟัชซี เป็นผลคูณคาร์ทีเซียนของฟัชซีเซตทั่วไป ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของฟัชซีเซต 2 ชุดหรือมากกว่า

เมื่อ  $X, Y \subseteq R$  เป็นเซตทั่วไป ดังนั้น

$$R = \{((x, y), \mu_R(x, y)) \mid (x, y) \in X \times Y\} \quad (2-13)$$

สมการดังกล่าวจะถูกเรียกว่าความสัมพันธ์แบบฟัชซีใน  $X \times Y \subseteq R$

หรือ  $X$  และ  $Y$  คือฟัชซีเซต ดังนั้นความสัมพันธ์แบบฟัชซี  $R(x, y)$  จะได้เป็น

$$R(x, y) = \left\{ \frac{\mu_R(x, y)}{(x, y)} \mid (x, y) \in X \times Y \right\} \quad (2-14)$$

ความสัมพันธ์แบบฟัซซีส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ขนาด  $m \times n$

$$R = \begin{bmatrix} \mu_R(x_1, y_1) & \cdots & \mu_R(x_1, y_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_R(x_m, y_1) & \cdots & \mu_R(x_m, y_n) \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

#### 2.5.4 ประพจน์แบบคลุมเครือ

ประพจน์แบบคลุมเครือเป็นประพจน์ที่เกี่ยวข้องกับแนวคิดที่ไม่มีขอบเขตชัดเจน ภาษาธรรมชาติส่วนใหญ่มีลักษณะคลุมเครือในแง่ของข้อกำหนด ค่าความจริงของประพจน์  $P$  เป็นค่าใดก็ได้ในช่วง  $[0, 1]$  การกำหนดค่าความจริงของประพจน์คือ การจัดเทียบ (Mapping) จาก  $[0, 1]$  ไปยังเอกภพ  $U$  ของค่าความจริง  $T$  ดังต่อไปนี้

$$T : u \in U \rightarrow (0,1) \quad (2-16)$$

ในตรรกะแบบฟัซซี กำหนดประพจน์  $P$  เป็นฟัซซีเซต  $A$  ดังนั้น ค่าความจริงของประพจน์ จะได้

$$T(P) : \mu_A(x) \text{ where } 0 \leq \mu_A \leq 1 \quad (2-17)$$

การแสดงออกของค่าความจริงสำหรับประพจน์  $P : x \in A$  มีค่าเท่ากับค่าความเป็นสมาชิกของ  $x$  ในฟัซซีเซต  $A$

#### 2.5.5 การสื่อความ

การสื่อความเป็นเทคนิคสำหรับใช้หาฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความสัมพันธ์แบบฟัซซี ที่นิยามบนปริภูมิผลคูณคาร์ทีเซียน  $X \times Y$

1) การสื่อความของ Zadeh (Zadeh's or Classical Implication)

$$\mu_R(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (2-18)$$

2) การสื่อความของ Mamdani (Mamdani's or Correlation-minimum)

$$\mu_R(x, y) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (2-19)$$

3) การสื่อความของ Lukasiewicz (Lukasiewicz's Implication)

$$\mu_R(x, y) = \max[1, (1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))] \quad (2-20)$$

4) การสื่อความผลคูณสหสัมพันธ์ (Correlation-product Implication)

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (2-21)$$

5) การสื่อความแบบ Brouwerian (Brouwerian Implication)

$$\mu_R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{for } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ \mu_B(y) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-22)$$

### 2.5.6 ตัวแปรภาษา (linguistic variable)

ฟัซซีเซตสามารถประยุกต์ใช้ในการอธิบายค่าของตัวแปรในรูปคุณภาพ โดยใช้พจน์ภาษา (linguistic term) และในรูปปริมาณ โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ซึ่งแสดงความเป็นเซตแบบฟัซซี พจน์ภาษาใช้สำหรับการแสดงแนวทางการคิดในการสื่อสารของมนุษย์ โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามารถนำไปช่วยในการจัดการกับข้อมูลเข้าเชิงตัวเลข โดยตัวแปรภาษาเป็นการประกอบกัน (composition) ของตัวแปรสัญลักษณ์ (symbolic variable) ซึ่งมีความสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์หรือพัฒนาทางด้านปัญญาประดิษฐ์ และการตัดสินใจบนพื้นฐานของตัวแปรเชิงตัวเลข (numerical variable) ที่มีใช้กันในงานด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ ทางการแพทย์ และอื่น ๆ

### 2.5.7 ระบบกฎแบบฟัซซี (fuzzy Rule-based Systems; FRBS)

หรือระบบอนุมานแบบคลุมเครือเป็นกฎหรือวิทยาการที่ใช้แก้ปัญหาความไม่แน่นอน ความไม่แม่นยำ และไม่เป็นเส้นตรง ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซต ในรูปแบบของประโยคดังต่อไปนี้ [3]

IF premise (antecedent), THEN conclusion (consequent)



ซึ่งขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซีจำนวน 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงอินพุตแบบดั้งเดิมเป็นอินพุตแบบฟัซซี (Fuzzify Input) เป็นขั้นตอนการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแต่ละอินพุตและความสำคัญต่อเอาต์พุต โดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นกำหนดตัวแปรภาษา

ขั้นตอนที่ 2 การใช้ตัวดำเนินการแบบฟัซซี (Apply Fuzzy Operator) เป็นขั้นตอนการแปลงค่าอินพุตแบบดั้งเดิมให้เป็นอินพุตแบบฟัซซี

ขั้นตอนที่ 3 การใช้วิธีการสื่อความ (Apply Implication Method)

ขั้นตอนที่ 4 การรวบรวมเอาต์พุตทั้งหมด (Aggregate All Outputs)

ขั้นตอนที่ 5 การแปลงค่าฟัซซีเป็นค่าปกติ (Defuzzify) เป็นการใช้สมการคณิตศาสตร์เปลี่ยนค่าฟัซซีเอาต์พุตเป็นค่าปกติ

โดยระบบกฎแบบฟัซซี สามารถแบ่งรูปแบบกฎทั่วไปออกได้เป็น 3 รูปแบบ

[3] ดังนี้

1) รูปแบบกฎฟัซซีแบบ Mamdani เป็นรูปแบบที่ใช้ตัวแปรทั้งในข้อนำ (Antecedent) และข้อตาม (Consequence) เพื่อจัดเทียบฟังก์ชัน (Mapping Function) มีรูปแบบกฎตามรายละเอียดดังนี้

Rule 1 : IF ( $x_1$  is  $A_{11}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{12}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{1n}$ ) THEN  $y$  is  $C_1$

Rule 2 : IF ( $x_1$  is  $A_{21}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{22}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{2n}$ ) THEN  $y$  is  $C_2$

⋮

Rule L : IF ( $x_1$  is  $A_{L1}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{L2}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{Ln}$ ) THEN  $y$  is  $C_L$

โดยที่  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  เป็นตัวประกอบที่  $j$  ของตัวแปรอินพุต  $x$

$Y$  เป็นตัวแปรเอาต์พุต

$A_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  เป็นพจน์ภาษาของข้อนำหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อนำ ของกฎที่  $i$

$C_i$  เป็นพจน์ภาษาของข้อตามหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตาม ของกฎที่  $i$

กำหนด  $A^s$  เป็นฟัซซีเซตใหม่ของกฎข้อที่  $i$

$$A_i^s = A_{i1} \cap A_{i2} \cap \dots \cap A_{in} \quad (2-23)$$

จะได้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น

$$\mu_{A_s}(x) = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (2-24)$$

ถ้าอินพุตเข้ามาเป็น

$$(x_1 = x'_1), (x_2 = x'_2), \dots, (x_n = x'_n) \quad (2-25)$$

จะได้ค่าฟัซซีในส่วนของข้อนำเป็น

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_1}(x'_1), \mu_{A_2}(x'_2), \dots, \mu_{A_n}(x'_n)) \quad (2-26)$$

ค่าเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อสามารถหาได้จากสมการ

$$\mu_{C_i}(y) = \alpha_i \cap \mu_{C_i}(y) \quad (2-27)$$

ค่าเอาต์พุตรวมของระบบสามารถหาได้จากสมการ

$$\mu_C(y) = \max(\mu_{C_1}(y), \mu_{C_2}(y), \dots, \mu_{C_L}(y)) \quad (2-28)$$

ฟัซซีเอาต์พุตสามารถแปลงเป็นค่าปกติได้จาก

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_C(y_i)) \times y_i}{\sum_{i=1}^n (\mu_C(y_i))} \quad (2-29)$$

เมื่อ  $y^*$  เป็นค่าเซนทรอยด์ (Centroid) ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ผลรวมเอาต์พุตหาได้ โดยการใช้วิธีการจัดองค์ประกอบของค่าสูงสุด-ต่ำสุด

และค่าสูงสุด-ผลคูณ

2) รูปแบบกฎฟัซซีแบบ TSK เป็นรูปแบบที่ถูกพัฒนาต่อจากกฎฟัซซีแบบ Mamdani แตกต่างไปจากแบบ Mamdani (Mamdani-style Inference) ตรงการลดขั้นตอนการคำนวณหาจุดศูนย์กลาง ซึ่งมีรูปแบบกฎตามรายละเอียดดังนี้

Rule 1 : IF ( $x_1$  is  $A_{11}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{12}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{1n}$ )

$$\text{THEN } y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_{10} + b_{11}x_1 + \dots + b_{1n}x_n$$

Rule 2 : IF ( $x_1$  is  $A_{21}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{22}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{2n}$ )

$$\text{THEN } y_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_{20} + b_{21}x_1 + \dots + b_{2n}x_n$$

⋮

Rule L : IF ( $x_1$  is  $A_{L1}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{L2}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{Ln}$ )

$$\text{THEN } y_L = f_L(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_{L0} + b_{L1}x_1 + \dots + b_{Ln}x_n$$

โดยที่  $x_j, j = 1, 2, \dots, n$  เป็นตัวประกอบที่  $j$  ของตัวแปรอินพุต  $x$

$Y$  เป็นตัวแปรเอาต์พุต

$A_{ij}, i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, n$  เป็นพจน์ภาษาของข้อนำหรือฟังก์ชัน

ความเป็นสมาชิกของข้อนำ ของกฎที่  $i$

$C_i$  เป็นพจน์ภาษาของข้อตามหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตาม ของ

กฎที่  $i$

กำหนดอินพุตในรูปแบบ

$$(x_1 = x'_1), (x_2 = x'_2), \dots, (x_n = x'_n) \quad (2-30)$$

โดยที่  $x'_1, x'_2, \dots, x'_n$  เป็นค่าอินพุตใด ๆ จำได้ค่าฟัซซีส่วนของข้อนำเป็น

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_{i1}}(x'_1), \mu_{A_{i2}}(x'_2), \dots, \mu_{A_{in}}(x'_n)) \quad (2-31)$$

ค่าเอาต์พุตแบบฟัซซีของกฎแต่ละข้อหาได้จาก

$$y_i = b_{i0} + b_{i1}x_1 + \dots + b_{in}x_n \quad (2-32)$$

ค่าเอาต์พุตของระบบเป็นผลรวมจากเอาต์พุตในแต่ละกฎจาก

$$y = \frac{\sum_{i=1}^L \alpha_i \times y_i}{\sum_{i=1}^L \alpha_i} \quad (2-33)$$

3) รูปแบบกฎฟัซซีแบบบวกมาตรฐาน (Standard Additive Model : SAM)

ระบบนี้ในส่วนของข้อนำและข้อตามเป็นประพจน์ภาษาคล้ายกับรูปแบบกฎฟัซซีแบบ Mamdani ต่างกันตรงที่ส่วนข้อตามของกฎฟัซซีจะแสดงเป็นฟังก์ชันทิศทางเดียว ซึ่งเป็นค่าอนุมาณเอาต์พุตของแต่ละกฎที่เป็นค่าปกติทั่วไป ผลเอาต์พุตทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยน้ำหนักของเอาต์พุตจากแต่ละกฎ

$$y = \frac{\sum_{i=1}^L w_i \times z_i}{\sum_{i=1}^L w_i} \quad (2-34)$$

### 2.5.8 กลไกการอนุมานแบบฟัซซี

1) กลไกการอนุมานอย่างง่าย

เมื่อกำหนดให้กฎของฟัซซีระบบหนึ่งเป็นดังนี้

Rule 1 : IF (x is  $A_1$ ) AND (y is  $B_1$ ) ... THEN (z is  $C_1$ )

Rule 2 : IF (x is  $A_2$ ) AND (y is  $B_2$ ) ... THEN (z is  $C_2$ )

fact : x is  $\bar{x}_0$  and y is  $\bar{y}_0$

Consequence :  $z_0$

ค่าฟัซซีในส่วนข้อนำคำนวณได้จาก

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \quad \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \quad (2-35)$$

ค่ารวมทั้ง 2 กฎก็จะมีค่าเป็น

$$z_0 = \frac{\alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (2-36)$$

2) กลไกการอนุมานของ Mamdani เป็นกลไกการอนุมานในรูปแบบการดำเนินการด้วยค่าต่ำสุด และเชื่อมประโยคเป็นองค์ประกอบด้วยตัวดำเนินการสูงสุด ระดับค่าฟัซซีของกฎแต่ละข้อในส่วนข้อนำถูกกำหนดโดย  $\alpha_{i,i}$  หาได้จาก

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \quad \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \quad (2-37)$$

เอาต์พุตของแต่ละกฎสามารถหาได้จาก

$$C'_1(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)), \quad C'_2(w) = (\alpha_2 \wedge C_2(w)) \quad (2-38)$$

เอาต์พุตที่รวมแต่ละกฎเข้าด้วยกันสามารถหาได้จาก

$$C(w) = C'_1(w) \vee C'_2(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(w)) \quad (2-39)$$

3) กลไกการอนุมานของ TSK (Takagi-Sugeno-Kang)

ในระบบการอนุมานของ TSK มีโครงสร้างดังต่อไปนี้

Rule 1 : IF (x is  $A_1$ ) AND (y is  $B_1$ ) THEN  $z_1 = a_1 x + b_1 y$

Rule 2 : IF (x is  $A_2$ ) AND (y is  $B_2$ ) THEN  $z_2 = a_2 x + b_2 y$

fact : x is  $\bar{x}_0$  and y is  $\bar{y}_0$

Consequence :  $z_0$

ค่าฟัซซีในส่วนข้อนำคำนวณได้จาก

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \quad \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \quad (2-40)$$

เอาต์พุตของแต่ละกฎสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$z_1^* = a_1(x_0) + b_1(y_0), \quad z_2^* = a_2(x_0) + b_2(y_0) \quad (2-41)$$

สามารถรวมเอาต์พุตทั้งสองกฎได้จาก

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (2-42)$$

ถ้า เอาต์พุตทั้งหมด n กฎ สามารถหาได้จาก

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i^*}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (2-43)$$

4) กลไกการอนุมานของ Tsukamoto เป็นระบบฟัซซีที่มีพจน์ภาษาทั้งหมดเป็นฟังก์ชันสมาชิกในทิศทางเดียว ซึ่งระดับค่าฟัซซีของกฎจะถูกกำหนดโดย  $\alpha_i$  หาได้จาก

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \quad \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \quad (2-44)$$

เอาต์พุตของแต่ละกฎเป็นค่าทั่วไป  $z_1$  และ  $z_2$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha_1 = C_1(z_1), \quad \alpha_2 = C_2(z_2) \quad (2-45)$$

สามารถรวมเอาต์พุตทั้งสองกฎได้จาก

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (2-46)$$

ถ้า เอาต์พุตทั้งหมด  $n$  กฎ สามารถหาได้จาก

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (2-47)$$

5) กลไกการอนุมานของ Larsen ใช้ผลคูณในการอนุมานจากข้อนำไปข้อตาม และใช้วิธียุเนียนด้วยตัวดำเนินการสูงสุด ผลลัพธ์ของเอาต์พุตแต่ละกฎหาได้จาก

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \quad \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \quad (2-48)$$

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ C หาได้จากการยุเนียนเอาต์พุตแต่ละกฎ

$$C(w) = (\alpha_1 C_1(w)) \vee (\alpha_2 C_2(w)) \quad (2-49)$$

ถ้า เอาต์พุตทั้งหมด  $n$  กฎ สามารถหาได้จาก

$$C(w) = \bigvee_{i=1}^n \alpha_i C_i(w) \quad (2-50)$$

## 2.6 แนวคิด ทฤษฎี เกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANN)

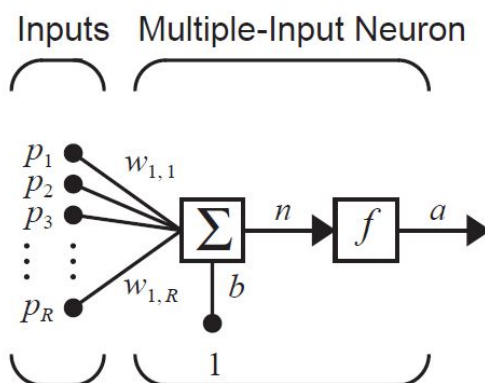
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANN) เป็นการนำหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้สร้างโมเดล เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายสมองของมนุษย์ ซึ่งสามารถทำงานและตัดสินใจเองได้ ด้วยการฝึกอบรม (Train) หรือการสอนโมเดลด้วยวิธีต่าง ๆ โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งตามลักษณะการประมวลผลได้ 3 แบบ <sup>[7]</sup> ได้แก่

1) โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว (Single-layer feed forward neural networks) ซึ่งจะมีชุดข้อมูลเข้า โครงข่ายประสาท และชุดข้อมูลออก เพียงชุดเดียว โดยมีการส่งกลับของข้อมูลออก เพื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในโครงข่ายประสาท

2) โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multi-layer feed forward neural networks) มีลักษณะเช่นเดียวกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว แต่จะมีการเพิ่มจำนวนของโครงข่ายประสาทซ้อนเข้ามาระหว่างข้อมูล เข้าและข้อมูลออก

3) โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (Back propagation neural network) จะมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว หรือโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น แต่จะมีการเปรียบเทียบค่าข้อมูลออกขั้นสุดท้ายกับค่าเป้าหมาย (Target) เพื่อนำค่าคลาดเคลื่อนมาเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในโครงข่ายประสาทให้โครงข่ายมีการคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยโครงข่ายประสาทเทียมสามารถอธิบายกระบวนการได้ตามภาพประกอบ 2-14 และสมการที่ 2-51 <sup>[7]</sup>



ภาพประกอบ 2-14 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks : ANN) [7]

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + w_{1,3}p_3 + w_{1,4}p_4 + w_{1,5}p_5 + b \quad (2-51)$$

โดยที่  $w$  = ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย

$p$  = ข้อมูลเข้า (input)

$b$  = ค่าอคติ (bias)

$n$  = ข้อมูลออก

ตามภาพประกอบ 2-14 ส่วนประกอบของโครงข่ายประสาทเทียม ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่

1) ชั้นข้อมูลเข้า (Input) เป็นการนำข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์และตัดสินใจเข้าโมเดล

2) นิวรอน (General Neuron) เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเข้า ตามการเรียนรู้ที่ออกแบบ ตามสมการที่ 2-51 ที่กำหนดค่าน้ำหนัก ค่าอคติ การตัดสินใจผ่านฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอน (Activation Function or Transfer Function)

3) ข้อมูลออก (output) เป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หรือตัดสินใจ เพื่อนำไปใช้ต่อไป

ฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอนจะเลือกตามลักษณะของโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์หรือลักษณะของข้อมูลเข้า เพื่อให้ได้รูปแบบการตัดสินใจที่ต้องการ ซึ่งฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอนจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันตามตารางที่ 2-15



ตารางที่ 2-15 รูปแบบฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอน	สมการฟังก์ชัน
Hard Limit	$a = 0 \quad n < 0$ $a = 1 \quad n \geq 0$
Linear	$a = n$
Symmetrical Hard Limit	$a = -1 \quad n < 0$ $a = +1 \quad n \geq 0$
Saturating Linear	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n \leq 1$ $a = 1 \quad n \geq 1$
Symmetric Saturating Linear	$a = -1 \quad n < -1$ $a = n \quad -1 \leq n \leq 1$ $a = 1 \quad n > 1$
Positive Linear	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad n \geq 0$
Sigmoid	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$
Hyperbolic Tangent	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$

โดยที่  $f$  = ฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์  
 $a$  = ข้อมูลออกขั้นสุดท้าย (output)

จากสมการที่ 2-51 ผ่านฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอนตามตารางที่ 2-15 จะได้ข้อมูลออกขั้นสุดท้าย  $a$  ของโครงข่ายประสาทเทียมที่ข้อมูลเข้า  $p$  ด้วยค่าน้ำหนักและค่าอคติที่กำหนดไว้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย  $t$  (Target) ด้วยกฎการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (backpropagation) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าน้ำหนัก ค่าอคติ ให้มีค่าคลาดเคลื่อน (error) ระหว่างข้อมูลออกขั้นสุดท้ายกับค่าเป้าหมายให้มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดหรืออยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของโครงข่ายประสาทเทียม ตามสมการที่ 2-52 และ 2-53

$$w_{new}^m(k+1) = \eta w_{old}^m(k) - (1-\eta)\alpha \delta^m(k) a^{m-1}(k) \quad (2-52)$$

$$b_{new}^m(k+1) = b_{new}^m(k) - (1-\eta)\alpha \delta^m(k) \quad (2-53)$$

โดยที่	$w_{new}^m$	=	ค่าน้ำหนักใหม่ที่ข้อมูลออก $m$
	$w_{old}^m$	=	ค่าน้ำหนักเก่าที่ข้อมูลออก $m$
	$\eta$	=	ค่าคงที่โมเมนต์มีค่าระหว่าง 0-1
	$\alpha$	=	อัตราการเรียนรู้มีค่าระหว่าง 0-1
	$\delta^m$	=	ค่าความไวของค่าผิดพลาดที่ข้อมูลออก $m$
	$k$	=	จำนวนรอบการเรียนรู้
	$b_{new}^m$	=	ค่าอคติใหม่ที่ข้อมูลออก $m$
	$b_{old}^m$	=	ค่าอคติเก่าที่ข้อมูลออก $m$

## 2.7 แนวคิดเกี่ยวกับประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ และการให้บริการผู้ใช้ไฟฟ้า การรักษาประสิทธิภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้นั้น ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่าย สายส่ง เสาไฟฟ้า รวมไปถึงสภาพแวดล้อมโดยรอบระบบจำหน่าย รวมไปถึงการบำรุงรักษาให้มีความพร้อมในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอในช่วงเวลาที่กำหนด ดังนั้น ความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า หมายถึง ความสามารถของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในการจัดส่งพลังงานไฟฟ้าสนองต่อความต้องการผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้จากดัชนีความเชื่อถือได้ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ <sup>[4]</sup> ดังนี้

### 1) ดัชนีที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าดับถาวร ประกอบด้วยดังนี้

(1) System Average Interruption Frequency Index : SAIFI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรในช่วงเวลาที่กำหนด

(2) System Average Interruption Duration Index : SAIDI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาไฟฟ้าดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรในช่วงเวลาที่กำหนด

(3) Customer Average Interruption Duration Index : CAIDI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงเวลาเฉลี่ยในการกู้คืนการจ่ายไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ

(4) Customer Total Average Interruption Duration Index : CTAIDI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยตรงต้องพบ

เจอภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับหลาย ๆ ครั้งจะนับรวมเป็นครั้งเดียว

(5) Customer Average Interruption Frequency Index : CAIFI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรโดยตรงต้องพบเจอกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรภายในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับหลาย ๆ ครั้งจะนับรวมเป็นครั้งเดียว

(6) Average Service Availability Index : ASAI คือ ดัชนีที่บ่งบอกสัดส่วนของเวลา (ร้อยละ) ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับการจ่ายไฟฟ้าในช่วงเวลาที่กำหนด

(7) Customer Experiencing Multiple Interruptions : CEMI<sub>n</sub> คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรเป็นจำนวน n ครั้งหรือมากกว่า ต่อจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด

(8) Customer Experiencing Long Interruption Durations : CELID คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่มีระยะเวลาไฟฟ้ายดับมากกว่าหรือเท่ากับเวลาที่กำหนด ไม่ว่าจะเป็ระยะเวลาไฟฟ้ายดับเหตุการณ์เดียวหรือระยะเวลาไฟฟ้ายดับรวมที่ผู้ใช้ไฟฟ้าประสบในช่วงเวลาที่กำหนด

2) ดัชนีที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าดับชั่วคราว ประกอบด้วยดังนี้

(1) Momentary Average Interruption Frequency Index : MAIFI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับชั่วคราว

(2) Momentary Average Interruption Event Frequency Index : MAIFI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งของเหตุการณ์ไฟฟ้าดับชั่วคราว

(3) Customer Experiencing Multiple Sustained Interruption and Momentary Interruption Events : CEMSMI<sub>n</sub> คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงอัตราส่วนของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรและไฟฟ้าดับชั่วคราวเป็นจำนวน n เหตุการณ์หรือมากกว่า ต่อจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ

3) ดัชนีที่เกี่ยวข้องกับโหลด ประกอบด้วยดังนี้

(1) Average System Interruption Frequency Index : ASIFI เป็นดัชนีที่พิจารณาจำนวนครั้งของเกิดกระแสไฟฟ้าดับ โดยพิจารณาจากใช้กระแสไฟฟ้าเป็นหลัก บางครั้งเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่ ๆ มีจำนวนผู้อยู่ไฟฟ้าน้อย แต่มีปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งจะพิจารณาเหมือนกันดัชนี SAIFI

(2) Average System Interruption Duration Index : ASIDI เป็นดัชนีที่พิจารณาระยะเวลาของเกิดกระแสไฟฟ้าดับ โดยพิจารณาจากใช้กระแสไฟฟ้าเป็นหลัก

ประโยชน์ของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นตัวเลขที่บอกถึงความสามารถหรือประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่นั้น ๆ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ผู้ลงทุนตัดสินใจตั้งโรงงานให้เหมาะสมกับลักษณะของกิจการได้ รวมไปถึงการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการลงทุนขยายหรือปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วย

## บทที่ 3

### การออกแบบและวิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ด้วยดัชนีสุขภาพ (Health Index) โดยการใช้วิธีตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic) ซึ่งมีวิธีในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

#### 3.1 บทนำ

#### 3.2 การออกแบบปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 3.3 การออกแบบตัวแปรเอาต์พุตของทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลง (Pre-HI : Pre-Health Index)

#### 3.4 การประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากตัวแปรเอาต์พุตทั้ง 5 ปัจจัย

#### 3.5 การออกแบบค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลง

#### 3.6 การเก็บข้อมูลสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลง

#### 3.7 การทดสอบและการประเมินผลการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 3.8 กรอบแนวทางการวิจัย

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้ อธิบายขั้นตอนการออกแบบ การทดสอบ และประเมินผลการทดสอบ เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายระบบ 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพหรือบ่งบอกสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการออกแบบจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil quality factor) ปัจจัยด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า (Age factor) ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า (Visual inspection factor) ปัจจัยด้านค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Insulation factor) และปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load factor) ซึ่งใช้วิธีตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับดัชนีสุขภาพ (Health Index) ที่ระบุถึงสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าขณะทำการประเมิน ทั้งสิ้น 4 ระดับ ได้แก่ สภาพดี สภาพเป็นที่ยอมรับได้ สภาพแย่มาก และสภาพแย่มาก โดยแต่ละสภาพจะมีการประมาณอายุการใช้งานต่อไปได้ที่แตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 3-1 เป็นการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งปัจจุบันมีลักษณะการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า 3 แบบ ได้แก่ แบบแขวน แบบนั่งร้าน และแบบตั้งพื้น มีการเข้าบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแตกต่างกันตามสภาพการติดตั้ง พื้นที่ติดตั้ง สภาพภาระโหลด และสภาพภูมิประเทศ โดยส่วนใหญ่จะมีการบำรุงรักษาปีละ 1 ครั้ง ผลของการบำรุงรักษาในแต่ละครั้งสามารถนำมาใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ควบคู่กับสถิติภาระโหลด ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้ จึงสนใจการนำค่าที่ได้จากการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า มาใช้ในการประเมินสภาพควบคู่ภาระโหลด โดยใช้วิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับดัชนีสุขภาพ (Health Index) ที่จะสามารถนำข้อมูลไปสู่การวางแผนบำรุงรักษา ซ่อมแซม และสับเปลี่ยนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องใหม่ ก่อนหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่อง ดังกล่าวชำรุดต่อไป



ภาพประกอบ 3-1 การติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV

### 3.2 การออกแบบปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบเป็นปัจจัยที่สามารถวัดค่า หรือเก็บรวบรวมได้จากการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละครั้ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถบ่งชี้สภาพหม้อแปลงไฟฟ้าได้จำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil quality factor) ปัจจัยด้านอายุ

ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Age factor) ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า (Visual inspection factor) ปัจจัยด้านค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Insulation factor) และปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load factor) โดยมีการออกแบบของแต่ละปัจจัย ดังนี้

### 3.2.1 ปัจจัยด้านคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

การวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ค่าการทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าได้จากการประมาณการด้วยการเทียบสีจากน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าตัวอย่าง มาใช้ในการออกแบบปัจจัยด้านคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยสามารถสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือได้ดังต่อไปนี้

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) โดยกำหนดระดับความเป็นสมาชิกได้จากค่าสูงสุดของผลทดสอบช่วงนั้น และค่าผลทดสอบต่ำสุดของช่วงถัดไปตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ระดับผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบ	ผลจากการทดสอบ (kV)	ระดับสภาพ
ค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	$\geq 45$	Very Good
	35 - 45	Good
	30 - 35	Fair
	$\leq 30$	Poor

ช่วงระดับผลการทดสอบมากกว่าหรือเท่ากับ 45 kV (Very Good) โดยเริ่มจากการทดสอบ 35 kV ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 35 - 45 kV ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 45 - 100 kV และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 100 kV

$$\text{trapezoidal}(x: 35, 45, 100, 100) = \begin{cases} 0 & x < 35 \\ (x-35)/(45-35) & 35 \leq x \leq 45 \\ 1 & 45 \leq x \leq 100 \\ (100-x)/(100-100) & 100 \leq x \leq 100 \\ 0 & x \geq 100 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการทดสอบระหว่าง 35 - 45 kV (Good) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 30 kV ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 30 - 37.5 kV และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1- 0 ที่ 37.5 - 45 kV

$$\text{triangular}(x: 30, 37.5, 45) = \begin{cases} 0 & x < 30 \\ (x-30)/(37.5-30) & 30 \leq x \leq 37.5 \\ (45-x)/(45-37.5) & 37.5 \leq x \leq 45 \\ 0 & x > 45 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการทดสอบระหว่าง 30 - 35 kV (Fair) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 25 kV ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 25 - 30 kV และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1- 0 ที่ 30 - 35 kV

$$\text{triangular}(x: 25, 30, 35) = \begin{cases} 0 & x < 25 \\ (x-25)/(30-25) & 25 \leq x \leq 30 \\ (35-x)/(35-30) & 30 \leq x \leq 35 \\ 0 & x > 35 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการทดสอบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 kV (Poor) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 0 kV ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 0 kV ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0 - 25 kV และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 25 - 30 kV

$$\text{trapezoidal}(x: 0, 0, 25, 30) = \begin{cases} 0 & X < 0 \\ (x-0)/(0-0) & 0 \leq x \leq 0 \\ 1 & 0 \leq x \leq 25 \\ (30-x)/(30-25) & 25 \leq x \leq 30 \\ 0 & x \geq 30 \end{cases}$$



- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) โดยกำหนดระดับความเป็นสมาชิกได้จากค่าสูงสุดของผลทดสอบช่วงนั้น และค่าผลทดสอบต่ำสุดของช่วงถัดไปตามตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ระดับผลการทดสอบค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบ	ผลจากการทดสอบ (เท่า)	ระดับสภาพ
ค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	$\leq 1.5$	Very Good
	1.5 – 2.0	Good
	2.0 – 2.5	Fair
	$\geq 2.5$	Poor

ช่วงระดับผลการทดสอบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.5 เท่า (Very Good) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 0 เท่า ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 0 เท่า ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0 – 1 เท่า และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 1 – 1.5 เท่า

$$trapezoidal(x:0,0,1,1.5) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ (x-0)/(0-0) & 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & 0 \leq x \leq 1 \\ (1.5-x)/(1.5-1) & 1 \leq x \leq 1.5 \\ 0 & x \geq 1.5 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการทดสอบระหว่าง 1.5 – 2.0 เท่า (Good) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 1 เท่า ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 1 – 1.5 เท่า และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1- 0 ที่ 1.5 - 2 เท่า

$$triangular(x:1,1.5,2) = \begin{cases} 0 & x < 1 \\ (x-1)/(1.5-2) & 1 \leq x \leq 1.5 \\ (2-x)/(2-1) & 1.5 \leq x \leq 2 \\ 0 & x > 2 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการทดสอบระหว่าง 2.0 – 2.5 เท่า (Fair) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 1.5 เท่า ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 1.5 – 2 เท่า และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1- 0 ที่ 2 – 2.5 เท่า

$$\text{triangular}(x:1.5,2,2.5) = \begin{cases} 0 & x < 1.5 \\ (x-1.5)/(2-1.5) & 1.5 \leq x \leq 2 \\ (2.5-x)/(2.5-2) & 2 \leq x \leq 2.5 \\ 0 & x > 2.5 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการทดสอบมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 เท่า (Poor) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 2 เท่า ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0-1 อยู่ที่ 2 – 2.5 เท่า ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 2.5 – 10 เท่า และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 10 เท่า

$$\text{trapezoidal}(x:2,2.5,10,10) = \begin{cases} 0 & x < 2 \\ (x-2)/(2.5-2) & 2 \leq x \leq 2.5 \\ 1 & 2.5 \leq x \leq 10 \\ (10-x)/(10-10) & 10 \leq x \leq 10 \\ 0 & x \geq 10 \end{cases}$$

ค่าความเป็นสมาชิกของผลทดสอบค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า จะกำหนดเป็นตัวประกอบที่ 1 และ 2 ของตัวแปรอินพุตของระบบฟัซซีแบบ Mamdani เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งกฎของฟัซซีแบบ Mamdani ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตมีความสัมพันธ์ ดังนี้

Rule 1 : IF ( $x_1$  is  $A_{11}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{12}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{1n}$ ) THEN  $y$  is  $C_1$

Rule 2 : IF ( $x_1$  is  $A_{21}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{22}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{2n}$ ) THEN  $y$  is  $C_2$

⋮

Rule L : IF ( $x_1$  is  $A_{L1}$ ) AND ( $x_2$  is  $A_{L2}$ ) ... AND ( $x_n$  is  $A_{Ln}$ ) THEN  $y$  is  $C_L$

โดยที่  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  เป็นตัวประกอบที่  $j$  ของตัวแปรอินพุต  $x$

$Y$  เป็นตัวแปรเอาต์พุต

$A_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  เป็นพจน์ภาษาของข้อนำหรือฟังก์ชัน

ความเป็นสมาชิกของข้อนำ ของกฎที่  $i$

$C_i$  เป็นพจน์ภาษาของข้อตามหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตาม ของกฎที่  $i$

การกำหนดกฎของฟuzzyแบบ Mamdani สามารถกำหนดได้จากสมการ 3-1 โดยให้ค่าน้ำหนักของค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 4 และค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2

$$OQF = \frac{\sum_{i=1}^2 S_i \times W_i}{6} \quad (3-1)$$

โดยที่  $OQF$  = ปัจจัยคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil quality factor)

$S_i$  = ค่าคะแนนประเมิน

$W_i$  = ค่าน้ำหนัก

ค่า  $OQF$  ที่ได้จะนำไปเทียบช่วงของการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อกำหนดกฎที่ทำให้เกิดตัวแปรเอาต์พุต ( $C_i$ ) ตามตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 การจัดคะแนนคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

$OQF$	ระดับสภาพ	ค่าคะแนน Pre-HI
$< 1.2$	Very Good	4
$1.2 \leq OQF < 1.5$	Good	3
$1.5 \leq OQF < 2$	Fair	2
$2 \leq OQF < 3$	Poor	1
$OQF \geq 3$	Very Poor	0

### 3.2.2 ปัจจัยด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

การวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ค่าอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มกำหนดระยะเวลาของอายุ ณ วันที่ติดตั้งใช้งาน จนถึงวันที่ทำการประเมินสภาพมาใช้ในการออกแบบปัจจัยด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยสามารถสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ ได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู

(Trapezoidal Membership function) โดยกำหนดระดับค่าความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง 6 ปี หรือกระจายด้านซ้ายและขวาของค่าอายุในแต่ละช่วงด้านละ 3 ปี ซึ่งสามารถสร้างฟังก์ชันความสมาชิกได้จากตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ระดับช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัย	อายุการใช้งาน (ปี)	ระดับสภาพ
อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า	0 - 6	Very Good
	6 - 14	Good
	14 - 25	Fair
	25 - 36	Poor
	> 36	Very Poor

ช่วงระดับอายุการใช้งาน 0 - 6 ปี (Very Good) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 0 ปี ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0 ปี ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0 - 3 ปี และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 9 ปี

$$\text{trapezoidal}(x: 0, 0, 3, 9) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ (x-0)/(0-0) & 0 \leq x \leq 3 \\ 1 & 0 \leq x \leq 3 \\ (0-x)/(9-3) & 3 \leq x \leq 9 \\ 0 & x \geq 9 \end{cases}$$

ช่วงระดับอายุการใช้งาน 6 - 14 ปี (Good) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 3 ปี ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 3 - 9 ปี ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 9 - 11 ปี และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 11 - 17 ปี

$$\text{trapezoidal}(x: 3, 9, 11, 17) = \begin{cases} 0 & x < 3 \\ (x-3)/(9-3) & 3 \leq x \leq 9 \\ 1 & 9 \leq x \leq 11 \\ (17-x)/(17-11) & 11 \leq x \leq 17 \\ 0 & x \geq 17 \end{cases}$$

ช่วงระดับอายุการใช้งาน 14 - 25 ปี (Fair) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 11 ปี ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 11 - 17 ปี ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 17 - 22 ปี และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 22 - 28 ปี

$$\text{trapezoidal}(x : 11, 17, 22, 28) = \begin{cases} 0 & x < 11 \\ (x - 11) / (17 - 11) & 11 \leq x \leq 17 \\ 1 & 17 \leq x \leq 22 \\ (28 - x) / (28 - 22) & 22 \leq x \leq 28 \\ 0 & x \geq 28 \end{cases}$$

ช่วงระดับอายุการใช้งาน 25 - 36 ปี (Poor) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 22 ปี ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 22 - 28 ปี ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 28 - 33 ปี และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 33 - 39 ปี

$$\text{trapezoidal}(x : 22, 28, 33, 39) = \begin{cases} 0 & x < 22 \\ (x - 22) / (28 - 22) & 22 \leq x \leq 28 \\ 1 & 28 \leq x \leq 33 \\ (39 - x) / (39 - 28) & 33 \leq x \leq 39 \\ 0 & x \geq 39 \end{cases}$$

ช่วงระดับอายุการใช้งานมากกว่า 36 ปี (Very Poor) โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 33 ปี ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 33 - 39 ปี ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 39 - 60 ปี และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 60 ปี

$$\text{trapezoidal}(x : 33, 39, 60, 60) = \begin{cases} 0 & x < 33 \\ (x - 33) / (39 - 33) & 33 \leq x \leq 39 \\ 1 & 39 \leq x \leq 60 \\ (60 - x) / (60 - 60) & 60 \leq x \leq 60 \\ 0 & x \geq 60 \end{cases}$$

ค่าความเป็นสมาชิกของอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า จะกำหนดเป็นตัวประกอบของตัวแปรอินพุตของระบบฟัซซีแบบ Mamdani เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรเอาต์พุตตามความสัมพันธ์ของระบบกฎฟัซซีแบบ Mamdani ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตตามตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ระดับช่วงคะแนนเอาต์พุตอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัย	ระดับสภาพ	ค่าคะแนน Pre-HI
อายุการใช้งานของหม้อแปลง ไฟฟ้า	Very Good	4
	Good	3
	Fair	2
	Poor	1
	Very Poor	0

### 3.2.3 ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า

การวิจัยครั้งนี้ได้ใช้การตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถมองเห็นได้ จากการตรวจสอบสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าตามแบบการบำรุงรักษาของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทั้งสิ้น 8 รายการ ตามตารางที่ 3-6 โดยสามารถสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยม (Rectangular Membership function) ของแต่ละช่วงที่ได้จากการตรวจสอบตามตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-6 ปัจจัยการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า

ลำดับที่	ปัจจัยการตรวจสอบสภาพภายนอก
1	การกัดกร่อนของตัวถัง
2	สภาพปลอกตัวนำ
3	ระบบกราวด์ หรือความต้านทานดิน
4	การร่วซึมของน้ำมันหม้อแปลง
5	ปริมาณน้ำมันในถัง
6	สภาพซีลยาง
7	การกัดกร่อนของตัวถังน้ำมันอะไหล่
8	จุดต่อตัวนำ (Connector)

ตารางที่ 3-7 ระดับการเสื่อมสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัย	จำนวนที่พบการเสื่อมสภาพ	ระดับสภาพ
การตรวจสอบสภาพภายนอก ของหม้อแปลงไฟฟ้า	ไม่พบการเสื่อมสภาพ	Very Good
	พบการเสื่อมสภาพจำนวน 1 – 2 รายการ	Good
	พบการเสื่อมสภาพจำนวน 3 รายการ	Fair
	พบการเสื่อมสภาพจำนวน 4 รายการ	Poor
	พบการเสื่อมสภาพมากกว่า 4 รายการ	Very Poor

ช่วงระดับที่ไม่พบการเสื่อมสภาพ (Very Good)

$$\text{rectangular}(x : 0, 0) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ช่วงระดับที่พบการเสื่อมสภาพจำนวน 1 – 2 รายการ (Good)

$$\text{rectangular}(x, 1, 2) = \begin{cases} 1 & 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ช่วงระดับที่พบการเสื่อมสภาพจำนวน 3 รายการ (Fair)

$$\text{rectangular}(x, 3, 3) = \begin{cases} 1 & 3 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ช่วงระดับที่พบการเสื่อมสภาพจำนวน 4 รายการ (Poor)

$$\text{rectangular}(x, 4, 4) = \begin{cases} 1 & 4 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ช่วงระดับที่พบการเสื่อมสภาพมากกว่า 4 รายการ (Poor)

$$\text{rectangular}(x, 5, 10) = \begin{cases} 1 & 5 \leq x \leq 10 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ค่าความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า จะกำหนดเป็นตัวประกอบของตัวแปรอินพุตของระบบฟัซซีแบบ Mamdani เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปร

เอาต์พุต ตามความสัมพันธ์ของระบบกฎฟuzzy แบบ Mamdani ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต ตามตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ระดับช่วงคะแนนเอาต์พุตของการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัย	ระดับสภาพ	ค่าคะแนน Pre-HI
การตรวจสอบสภาพภายนอก ของหม้อแปลงไฟฟ้า	Very Good	4
	Good	3
	Fair	2
	Poor	1
	Very Poor	0

### 3.2.4 ปัจจัยด้านค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

การวิจัยครั้งนี้ได้ใช้การตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า จากการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดค่าความเป็นฉนวนของขดลวด (Insulation Test) โดยการวัดค่าระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ และขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ โดยสามารถสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ ได้ดังนี้

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ได้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) โดยกำหนดระดับค่าความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง 100, 200, 400, 800 Mohm หรือกระจายด้านซ้ายและขวาของค่าความเป็นฉนวนในแต่ละช่วงด้านละ 50, 100, 200, 400 Mohm ซึ่งสามารถสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้จากตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 ระดับสภาพของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์

รูปแบบการวัดค่า	ผลการวัดค่าความเป็นฉนวน (Mohm)	ระดับสภาพ
ขดลวดแรงสูงกับกราวด์ (H-G Insulation)	$\geq 2000$	Very Good
	1000 - 2000	Good
	500 - 1000	Fair
	250 - 500	Poor



ตารางที่ 3-9 ระดับสภาพของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์ (ต่อ)

รูปแบบการวัดค่า	ผลการวัดค่าความเป็นฉนวน (Mohm)	ระดับสภาพ
ขดลวดแรงสูงกับกราวด์ (H-G Insulation)	< 250	Very Poor
ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรง ต่ำ (H-L Insulation)	≥ 2000	Very Good
	1000 - 2000	Good
	500 - 1000	Fair
	250 - 500	Poor
	< 250	Very Poor
ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ (L-G Insulation)	≥ 800	Very Good
	400 - 800	Good
	200 - 400	Fair
	100 - 200	Poor
	< 100	Very Poor

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนมากกว่า 2,000 Mohm (Very Good) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 1,600 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 1,600 - 2,000 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 2,000 - 5,000 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 5,000 Mohm

$$trapezoidal(x: 1600, 2400, 5000, 5000) = \begin{cases} 0 & x < 1600 \\ (x-1600)/(2400-1600) & 1600 \leq x \leq 2000 \\ 1 & 2000 \leq x \leq 5000 \\ (5000-x)/(5000-5000) & 5000 \leq x \leq 5000 \\ 0 & x \geq 5000 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนระหว่าง 1,000 - 2,000 Mohm (Good) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 800 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่

800 – 1,200 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 1,200 – 1,600 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 1,600 – 2,000 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 800, 1200, 1600, 2400) = \begin{cases} 0 & x < 800 \\ (x-800)/(1200-800) & 800 \leq x \leq 1200 \\ 1 & 1200 \leq x \leq 1600 \\ (2000-x)/(2000-1600) & 1600 \leq x \leq 2000 \\ 0 & x \geq 2000 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนระหว่าง 500 – 1,000 Mohm (Fair) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 400 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 400 – 600 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 600 – 800 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 800 – 1,200 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 400, 600, 800, 1200) = \begin{cases} 0 & x < 400 \\ (x-400)/(600-400) & 400 \leq x \leq 600 \\ 1 & 600 \leq x \leq 800 \\ (1200-x)/(1200-800) & 800 \leq x \leq 1200 \\ 0 & x \geq 1200 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนระหว่าง 250 – 500 Mohm (Poor) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 200 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 200 – 300 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 300 – 400 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 400 – 600 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 200, 300, 400, 600) = \begin{cases} 0 & x < 200 \\ (x-200)/(300-200) & 200 \leq x \leq 300 \\ 1 & 300 \leq x \leq 400 \\ (600-x)/(600-400) & 400 \leq x \leq 600 \\ 0 & x \geq 600 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนน้อยกว่า 250 Mohm (Very Poor) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 0 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0 Mohm

ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0 – 200 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 200 – 300 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 0, 0, 200, 300) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ (x-0)/(0-0) & 0 \leq x \leq 200 \\ 1 & 200 \leq x \leq 300 \\ (300-x)/(300-200) & 200 \leq x \leq 300 \\ 0 & x \geq 300 \end{cases}$$

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ได้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเช่นเดียวกับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ ได้ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) โดยกำหนดระดับความเป็นสมาชิกได้จากค่าสูงสุดของผลทดสอบช่วงนั้น และค่าผลทดสอบต่ำสุดของช่วงถัดไปตามตารางที่ 3-8

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนมากกว่า 800 Mohm (Very Good) โดยเริ่มจากการวัดค่าได้ 640 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 640 - 960 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 960 – 2,000 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 2,000 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 640, 960, 2000, 2000) = \begin{cases} 0 & x < 640 \\ (x-640)/(960-640) & 640 \leq x \leq 960 \\ 1 & 960 \leq x \leq 2000 \\ (2000-x)/(2000-2000) & 2000 \leq x \leq 2000 \\ 0 & x \geq 2000 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนระหว่าง 400 – 800 Mohm (Good) โดยเริ่มจากการวัดค่าได้ 320 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 320 - 480 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 480 – 640 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 640 - 960 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 320, 480, 640, 960) = \begin{cases} 0 & x < 320 \\ (x - 320) / (480 - 320) & 320 \leq x \leq 480 \\ 1 & 480 \leq x \leq 640 \\ (960 - x) / (960 - 640) & 640 \leq x \leq 960 \\ 0 & x \geq 960 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนระหว่าง 200 – 400 Mohm (Fair) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 160 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 160 - 240 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 240 – 320 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 320 - 480 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 160, 240, 320, 480) = \begin{cases} 0 & x < 160 \\ (x - 160) / (240 - 160) & 160 \leq x \leq 240 \\ 1 & 240 \leq x \leq 320 \\ (480 - x) / (480 - 320) & 320 \leq x \leq 480 \\ 0 & x \geq 480 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนระหว่าง 100 – 200 Mohm (Poor) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 80 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 80 - 120 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 120 – 160 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 160 - 240 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x : 80, 120, 160, 240) = \begin{cases} 0 & x < 80 \\ (x - 80) / (120 - 80) & 80 \leq x \leq 120 \\ 1 & 120 \leq x \leq 160 \\ (240 - x) / (240 - 160) & 160 \leq x \leq 240 \\ 0 & x \geq 240 \end{cases}$$

ช่วงระดับผลการวัดค่าความเป็นฉนวนน้อยกว่า 100 Mohm (Very Poor) โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 0 Mohm ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0 Mohm ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0 – 80 Mohm และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 80 - 120 Mohm

$$\text{trapezoidal}(x:0,0,80,120) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ (x-0)/(0-0) & 0 \leq x \leq 0 \\ 1 & 0 \leq x \leq 80 \\ (120-x)/(120-80) & 80 \leq x \leq 120 \\ 0 & x \geq 120 \end{cases}$$

ค่าความเป็นสมาชิกของความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ และขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ จะกำหนดเป็นตัวประกอบที่ 1, 2 และ 3 ของตัวแปรอินพุตของระบบฟัซซี่แบบ Mamdani เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรเอาต์พุต โดยสามารถกำหนดกฎของฟัซซี่แบบ Mamdani ได้จากสมการ 3-2 โดยให้ค่าน้ำหนักของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์มีค่าเท่ากับ 4 ค่าน้ำหนักของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำมีค่าเท่ากับ 4 และค่าน้ำหนักของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับกราวด์มีค่าเท่ากับ 2

$$Ins = \frac{\sum_{i=1}^3 I_i \times W_i}{10} \quad (3-2)$$

โดยที่  $Ins$  = ปัจจัยค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า  
 $I_i$  = ค่าคะแนนประเมินสภาพ  
 $W_i$  = ค่าน้ำหนัก

ค่า  $Ins$  ที่ได้จะนำไปเทียบช่วงของการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อกำหนดกฎที่ทำให้เกิดตัวแปรเอาต์พุต ( $C_L$ ) ตามตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 การจัดคะแนนค่าสภาพความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

$Ins$	ระดับสภาพ	ค่าคะแนน Pre-HI
0 - 1.2	Very Good	4
1.2 - 2	Good	3
2 - 2.8	Fair	2
2.8 - 3.4	Poor	1
3.4 - 4	Very Poor	0

### 3.2.5 ปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load factor)

การวิจัยครั้งนี้ได้ใช้การตรวจสอบทางสถิติในการรับภาระจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการวัดในแต่ละเดือนหรือข้อมูลจากระบบแผนที่ภูมิศาสตร์ระบบไฟฟ้า (GIS) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการนำอัตราการจ่ายโหลดสูงสุดจำนวน 4 เดือน มาคำนวณหาอัตราส่วนการจ่ายโหลดของแต่ละเดือนจากสมการ 3-3

$$N_i = \frac{S_i}{S_B} \quad (3-3)$$

โดยที่

$N_i$  = อัตราการจ่ายโหลดของเดือน

$S_i$  = การจ่ายโหลดสูงสุดของเดือน

$S_B$  = พิกัดกำลังหม้อแปลงไฟฟ้า

นำค่าอัตราการจ่ายโหลดของแต่ละเดือนเป็นตัวแปรอินพุตระบบฟัซซีแบบ Mamdani เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรเอาต์พุต โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) ของอัตราการจ่ายโหลด เป็นฟังก์ชันสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) โดยกำหนดระดับความเป็นสมาชิกได้จากค่าสูงสุดของผลทดสอบช่วงนั้น และค่าผลทดสอบต่ำสุดของช่วงถัดไปตามตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 การประเมินการจ่ายโหลด

$N_i$	$i$
$N_i < 0.6$	0
$0.6 \leq N_i < 0.8$	1
$0.8 \leq N_i < 1.0$	2
$1.0 \leq N_i < 1.2$	3
$N_i \geq 1.2$	4

ช่วงระดับอัตราการจ่ายโหลดน้อยกว่า 0.6 โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 0 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0 - 0.55 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 0.55 - 0.65

$$\text{trapezoidal}(x:0,0,0.55,0.65) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ (x-0)/(0-0) & 0 \leq x \leq 0 \\ 1 & 0 \leq x \leq 0.55 \\ (0.65-x)/(0.65-0.55) & 0.55 \leq x \leq 0.65 \\ 0 & x \geq 0.65 \end{cases}$$

ช่วงระดับอัตราการจัดจ่ายโหลระหว่าง 0.6 – 0.8 โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 0.55 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0.55 – 0.65 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0.65 – 0.75 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 0.75 – 0.85

$$\text{trapezoidal}(x:0.55,0.65,0.75,0.85) = \begin{cases} 0 & x < 0.55 \\ (x-0.55)/(0.65-0.55) & 0.55 \leq x \leq 0.65 \\ 1 & 0.65 \leq x \leq 0.75 \\ (0.85-x)/(0.85-0.75) & 0.75 \leq x \leq 0.85 \\ 0 & x \geq 0.85 \end{cases}$$

ช่วงระดับอัตราการจัดจ่ายโหลระหว่าง 0.8 – 1.0 โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 0.75 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0.75 – 0.85 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0.85 – 0.95 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 0.95 – 1.05

$$\text{trapezoidal}(x:0.75,0.85,0.95,1.05) = \begin{cases} 0 & x < 0.75 \\ (x-0.75)/(0.85-0.75) & 0.75 \leq x \leq 0.85 \\ 1 & 0.85 \leq x \leq 0.95 \\ (1.05-x)/(1.05-0.95) & 0.95 \leq x \leq 1.05 \\ 0 & x \geq 1.05 \end{cases}$$

ช่วงระดับอัตราการจัดจ่ายโหลระหว่าง 1.0 – 1.2 โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 0.95 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0.95 – 1.05 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 1.05 – 1.15 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 1.15 – 1.25

$$\text{trapezoidal}(x:0.95,1.05,1.15,1.25) = \begin{cases} 0 & x < 0.95 \\ (x-0.95)/(1.05-0.95) & 0.95 \leq x \leq 1.05 \\ 1 & 1.05 \leq x \leq 1.15 \\ (1.25-x)/(1.25-1.15) & 1.15 \leq x \leq 1.25 \\ 0 & x \geq 1.25 \end{cases}$$

ช่วงระดับอัตราการจ่ายโหลดมากกว่า 1.2 โดยเริ่มจากผลการวัดค่าได้ 1.15 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 1.15 - 1.25 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 1.25 - 2 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 2

$$\text{trapezoidal}(x:1.15,1.25,2,2) = \begin{cases} 0 & x < 1.15 \\ (x-1.15)/(1.25-1.15) & 1.15 \leq x \leq 1.25 \\ 1 & 1.25 \leq x \leq 2 \\ (2-x)/(2-2) & 2 \leq x \leq 2 \\ 0 & x \geq 2 \end{cases}$$

ค่าตัวแปรเอาต์พุตของอัตราการจ่ายโหลดแต่ละเดือนจำนวน 4 เดือน จะนำไปคำนวณหาภาวะการรับโหลด (Load factor : LF) ตามสมการ 3-4

$$LF = \frac{\sum_{i=0}^4 (4-i) \times N_i}{\sum_{i=0}^4 N_i} \quad (3-4)$$

ค่าภาวะการรับโหลด (LF) ที่ได้จะเป็นตัวแปรอินพุตระบบฟัซซีแบบ Mamdani ของโหลดโดยรวม โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Membership function) เป็นฟังก์ชันสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) โดยกำหนดระดับค่าความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง 1 หรือกระจายด้านซ้ายและขวาของค่าความเป็นฉนวนในแต่ละช่วงด้านละ 0.5 ซึ่งสามารถสร้างฟังก์ชันความสมาชิกได้จากตารางที่ 3-12



ตารางที่ 3-12 ระดับการประเมินค่าภาวการณ์รับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

$LF$	ระดับสภาพ	ค่าคะแนน Pre-HI
$LF > 3.5$	Very Good	4
$2.5 \leq LF < 3.5$	Good	3
$1.5 \leq LF < 2.5$	Fair	2
$0.5 \leq LF < 1.5$	Poor	1
$LF \leq 0.5$	Very Poor	0

ช่วงระดับภาวการณ์รับโหลดมากกว่า 3.5 (Very Good) โดยเริ่มจากผลการคำนวณ 3.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 3.5 - 4 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 4 - 6 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่ 6

$$\text{trapezoidal}(x: 3.5, 4, 6, 6) = \begin{cases} 0 & x < 3.5 \\ (x-3.5)/(4-3.5) & 3.5 \leq x \leq 4 \\ 1 & 4 \leq x \leq 6 \\ (6-x)/(6-6) & 6 \leq x \leq 6 \\ 0 & x \geq 6 \end{cases}$$

ช่วงระดับภาวการณ์รับโหลดระหว่าง 2.5 - 3.5 (Good) โดยเริ่มจากผลการคำนวณ 2.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 2.5 - 3 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 3 - 3.5 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่ 3.5 - 4

$$\text{trapezoidal}(x: 2.5, 3, 3.5, 4) = \begin{cases} 0 & x < 2.5 \\ (x-2.5)/(3-2.5) & 2.5 \leq x \leq 3 \\ 1 & 3 \leq x \leq 3.5 \\ (4-x)/(4-3.5) & 3.5 \leq x \leq 4 \\ 0 & x \geq 4 \end{cases}$$

ช่วงระดับภาวการณ์รับโหลดระหว่าง 1.5 - 2.5 (Fair) โดยเริ่มจากผลการคำนวณ 1.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 1.5 - 2 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 2 - 2.5 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่ 2.5 - 3

$$\text{trapezoidal}(x:1.5,2,2.5,3) = \begin{cases} 0 & x < 1.5 \\ (x-1.5)/(2-1.5) & 1.5 \leq x \leq 2 \\ 1 & 2 \leq x \leq 2.5 \\ (3-x)/(3-2.5) & 2.5 \leq x \leq 3 \\ 0 & x \geq 3 \end{cases}$$

ช่วงระดับภาวะการณั้รับโหดระหว่าง 0.5 – 1.5 (Poor) โดยเริ่มจากผลการคำนวณ 0.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0.5 - 1 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 1 - 1.5 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่ 1.5 - 2

$$\text{trapezoidal}(x:0.5,1,1.5,2) = \begin{cases} 0 & x < 0.5 \\ (x-0.5)/(1-0.5) & 0.5 \leq x \leq 1 \\ 1 & 1 \leq x \leq 1.5 \\ (2-x)/(2-1.5) & 1.5 \leq x \leq 2 \\ 0 & x \geq 2 \end{cases}$$

ช่วงระดับภาวะการณั้รับโหดน้อยกว่า 0.5 (Very Poor) โดยเริ่มจากผลการคำนวณ 0 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 0 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 0 - 0.5 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่ 0.5 - 1

$$\text{trapezoidal}(x:0,0,0.5,1) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ (x-0)/(0-0) & 0 \leq x \leq 0 \\ 1 & 0 \leq x \leq 0.5 \\ (1-x)/(1-0.5) & 0.5 \leq x \leq 1 \\ 0 & x \geq 1 \end{cases}$$

### 3.3 การออกแบบตัวแปรเอาต์พุตของทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลง (Pre-HI : Pre-Health Index)

การวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบตัวแปรเอาต์พุตของทั้ง 5 ปัจจัย โดยการสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือที่มีลักษณะเดียวกัน ด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) กำหนดระดับค่าความเป็นสมาชิกอยู่ในช่วง 0.5 ซึ่งกระจายด้านซ้ายของ Pre-HI ในแต่ละช่วง โดยสามารถสร้างฟังก์ชันความสมาชิกจากตารางที่ 3-13

ตารางที่ 3-13 ระดับคะแนนตัวแปรเอาต์พุตของทั้ง 5 ปัจจัย

ระดับสภาพ	ค่าคะแนน Pre-HI
Very Good	4
Good	3
Fair	2
Poor	1
Very Poor	0

ช่วงระดับคะแนนเท่ากับ 4 (Very Good) โดยเริ่มจากคะแนนที่ได้ 3.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่คะแนน 3.5 - 4 และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่คะแนน 4

$$triangular(x: 3.5, 4, 4) = \begin{cases} 0 & x < 3.5 \\ (x-3.5)/(4-3.5) & 3.5 \leq x \leq 4 \\ (4-x)/(4-4) & 4 \leq x \leq 4 \\ 0 & x > 4 \end{cases}$$

ช่วงระดับคะแนนเท่ากับ 3 (Good) โดยเริ่มจากคะแนนที่ได้ 2.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่คะแนน 2.5 - 3.5 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 อยู่ที่คะแนน 2.5 - 3.5 และระดับค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่คะแนน 3.5 - 4

$$trapezoidal(x: 2.5, 3, 3.5, 4) = \begin{cases} 0 & x < 2.5 \\ (x-2.5)/(3-2.5) & 2.5 \leq x \leq 3 \\ 1 & 3 \leq x \leq 3.5 \\ (4-x)/(4-3.5) & 3.5 \leq x \leq 4 \\ 0 & x \geq 4 \end{cases}$$

ช่วงระดับคะแนนเท่ากับ 2 (Fair) โดยเริ่มจากคะแนนที่ได้ 1.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่คะแนน 1.5 - 2 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 อยู่ที่คะแนน 2 - 2.5 และระดับค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่คะแนน 2.5 - 3

$$\text{trapezoidal}(x:1.5,2,2.5,3) = \begin{cases} 0 & x < 1.5 \\ (x-1.5)/(2-1.5) & 1.5 \leq x \leq 2 \\ 1 & 2 \leq x \leq 2.5 \\ (3-x)/(3-2.5) & 2.5 \leq x \leq 3 \\ 0 & x \geq 3 \end{cases}$$

ช่วงระดับคะแนนเท่ากับ 1 (Poor) โดยเริ่มจากคะแนนที่ได้ 0.5 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่คะแนน 0.5 - 1 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 อยู่ที่คะแนน 1 - 1.5 และระดับค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่คะแนน 1.5 - 2

$$\text{trapezoidal}(x:0.5,1,1.5,2) = \begin{cases} 0 & x < 0.5 \\ (x-0.5)/(1-0.5) & 0.5 \leq x \leq 1 \\ 1 & 1 \leq x \leq 1.5 \\ (2-x)/(2-1.5) & 1.5 \leq x \leq 2 \\ 0 & x \geq 2 \end{cases}$$

ช่วงระดับคะแนนเท่ากับ 0 (Very Poor) โดยเริ่มจากคะแนนที่ได้ 0.0 ที่มีระดับค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่คะแนน 0 ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 อยู่ที่คะแนน 0 - 0.5 และระดับค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 อยู่ที่คะแนน 0.5 - 1

$$\text{trapezoidal}(x:0,0,0.5,1) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ (x-0)/(1-0) & 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1 & 0.5 \leq x \leq 1 \\ (1-x)/(1-0.5) & 1 \leq x \leq 1.5 \\ 0 & x \geq 1.5 \end{cases}$$

### 3.4 การประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากตัวแปรเอาต์พุตทั้ง 5 ปัจจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการแบ่งระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าสภาพดี หม้อแปลงไฟฟ้าสภาพยอมรับได้ หม้อแปลงไฟฟ้าสภาพแย่มาก และหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพแย่มาก ซึ่งในแต่ละสภาพได้ระบุวิธีดำเนินการรายละเอียดการบำรุงรักษา ซ่อมแซม และอายุที่คาดการณ์ว่ายังคงใช้งานได้ ตามตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-14 ดัชนีสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่าดัชนีสุขภาพ	ดัชนีสุขภาพ	การดำเนินการ	อายุการใช้งานที่คาดการณ์ สามารถใช้งานได้
70 - 100	ดี	ดำเนินการตามปกติ	มากกว่า 10 ปี
50 - 70	ยอมรับได้	เฝ้าระวัง / เพิ่มการบำรุงรักษา	3 - 10 ปี
30 - 50	แย่มาก	เฝ้าระวัง ซ่อมแซม / Rebuild	น้อยกว่า 3 ปี
0 - 30	แย่มาก	ซ่อมแซม / สับเปลี่ยนโดยเร็วที่สุด	หมดอายุการใช้งาน

โดยการหาค่าดัชนีสุขภาพ (Health Index) สามารถหาได้จากการคำนวณตามสมการที่ 3-5 จากค่า Per-HI ทั้ง 5 ปัจจัย ที่มีน้ำหนักแต่ละปัจจัยตามหัวข้อ 3.5

$$HI = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n c_i DI_i}{\sum_{i=1}^n 4c_i} \quad (3-5)$$

โดยที่  $DI_i$  = ค่าดัชนีจากการตรวจสอบหรือข้อมูลการบำรุงรักษา  
 $c_i$  = การประเมินเกณฑ์ของแต่ละองค์ประกอบหรือน้ำหนัก  
 ของแต่ละปัจจัยการประเมิน  
 $n$  = จำนวนลำดับขององค์ประกอบหรือปัจจัยการประเมิน  
 หรือเท่ากับ 5

### 3.5 การออกแบบค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลง  $c_i$  จะออกแบบจากการเก็บข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงย้อนหลังตามอายุการใช้งานที่คาดการณ์สามารถใช้งานได้เพื่อสามารถกำหนดระดับของสภาพหม้อแปลงทั้ง 4 ระดับ จำนวน 150 ข้อมูล ที่ผ่านการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic) ตามหัวข้อ 3.2 และทำการปรับฐานของข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0-1 (Normalize) ตามตารางที่ 3-15 ด้วยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks : ANN) ตามสมการที่ 3-6

ตารางที่ 3-15 การปรับฐานข้อมูลของค่าดัชนีสุขภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่าดัชนีสุขภาพ	ดัชนีสุขภาพ	ค่ากลางค่าดัชนีสุขภาพ	ค่าที่ทำการปรับฐาน
70 - 100	ดี	85	1
50 - 70	ยอมรับได้	60	0.7059
30 - 50	แย่มาก	40	0.4706
0 - 30	แย่มาก	15	0.1765

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + w_{1,3}p_3 + w_{1,4}p_4 + w_{1,5}p_5 + b \quad (3-6)$$

โดยที่  $w$  = ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย

$p$  = ข้อมูลเข้า (input)

$b$  = ค่าอคติ (bias)

$n$  = ข้อมูลออก

งานวิจัยนี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ (Back propagation neural network) และฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่วงโอนซิกมอยด์ (Sigmoid Activation Function) ที่เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งลักษณะ “S-curve” หรือเรียกว่า “Sigmoid curve” มีค่าระหว่าง 0 และ 1 ตามสมการที่ 3-7

$$a = f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (3-7)$$

โดยที่  $f$  = ฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์

$a$  = ข้อมูลออกขั้นสุดท้าย (output)

### 3.6 การเก็บข้อมูลสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

การวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดแนวทางการเก็บข้อมูลสำหรับนำมาประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า จากข้อมูลการบำรุงรักษาและการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย

33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จำนวน 180 ตัวอย่าง แบ่งเป็นตัวอย่างสำหรับนำมาฝึกอบรม (Train) จำนวน 150 ตัวอย่าง และตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบความถูกต้อง (Accuracy) จำนวน 30 ตัวอย่าง ซึ่งใน 180 ตัวอย่างแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เป็นผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าใหม่ติดตั้งใช้งานไม่เกิน 10 ปี หรือได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญของแผนกมิเตอร์และหม้อแปลง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาพดีสามารถใช้งานได้มากกว่า 10 ปี นำมากำหนดให้ผลการประเมินอยู่ในช่วง สภาพดี

กลุ่มที่ 2 เป็นผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในอดีตของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ชำรุดในปัจจุบันย้อนหลัง 4 – 9 ปี นำมากำหนดให้ผลการประเมินอยู่ในช่วง สภาพยอมรับได้

กลุ่มที่ 3 เป็นผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในอดีตของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ชำรุดในปัจจุบันย้อนหลัง 1 – 3 ปี นำมากำหนดให้ผลการประเมินอยู่ในช่วง สภาพแย่มาก

กลุ่มที่ 4 เป็นผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าที่ชำรุดในปัจจุบัน นำมากำหนดให้ผลการประเมินอยู่ในช่วง สภาพแย่มาก

### 3.7 การทดสอบและการประเมินผลการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

การวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดแนวทางการทดสอบและการประเมินการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า จากการนำข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 30 ตัวอย่าง มาป้อนให้กับระบบประเมินสภาพหม้อแปลงแล้วนำผลการประเมินที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลสภาพจริงของหม้อแปลงตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบประเมินที่ออกแบบตามสมการที่ 3-8

$$\% \text{Accuracy} = \frac{|x_{\text{estimate}} - x_{\text{actual}}|}{x_{\text{actual}}} \times 100 \quad (3-8)$$

โดยที่ %Accuracy = ค่าความถูกต้องของระบบ

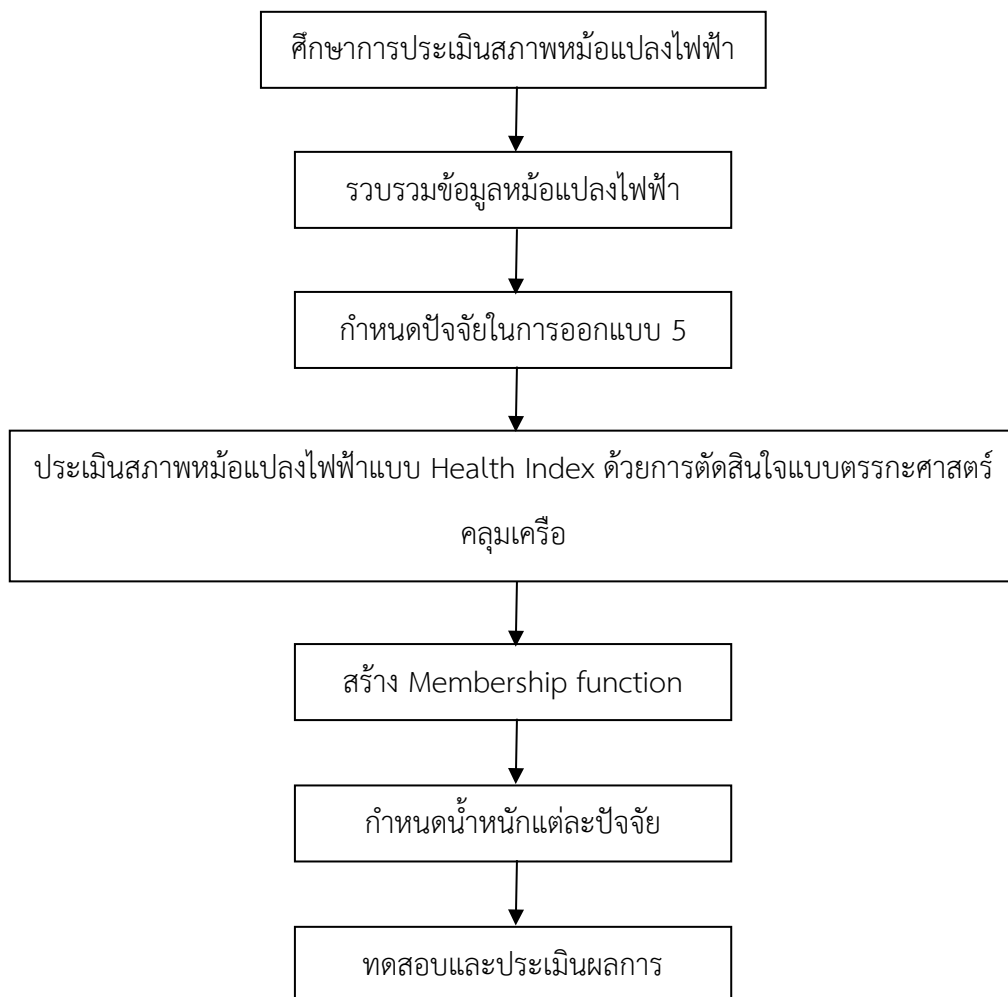
$x_{\text{estimate}}$  = จำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าตัวอย่างที่ประเมินสภาพถูกต้อง

ตามจริง

$x_{\text{actual}}$  = จำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นตัวอย่าง

ทั้งนี้ ค่าความถูกต้องของระบบที่ยอมรับได้กำหนดไว้ที่ มากกว่าหรือเท่า 80%

### 3.8 กรอบแนวทางการวิจัย



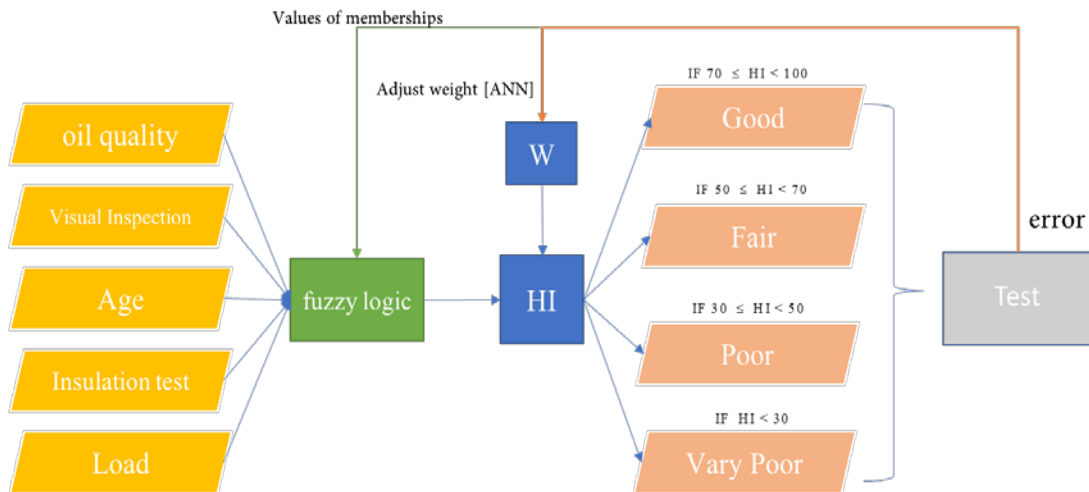
ภาพประกอบ 3-2 กรอบแนวทางการวิจัย



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูล สำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ด้วยดัชนีสุขภาพ (Health Index) โดยการใช้วิธีตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีตรรกะคลุมเครือ (Fuzzy Logic) ซึ่งออกแบบและจำลองการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK ตามรูปแบบการประเมินในภาพประกอบ 4-1



ภาพประกอบ 4-1 รูปแบบการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของงานวิจัย

สามารถนำเสนอผลการศึกษา วิเคราะห์ข้อมูล และอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลการออกแบบปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า
- 4.2 ผลการกำหนดค่าน้ำหนักของทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า
- 4.3 ผลการทดสอบและการประเมินผลการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า
- 4.4 การอภิปรายผลการศึกษา

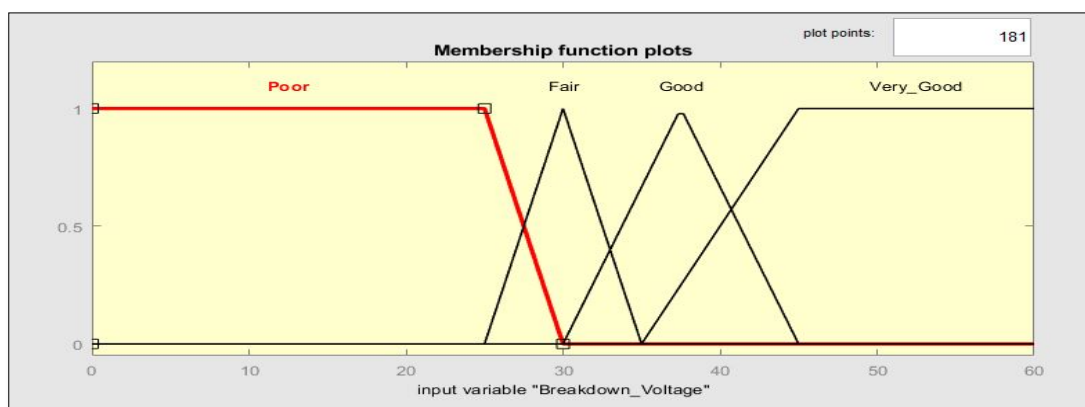
#### 4.1 ผลการออกแบบปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการออกแบบปัจจัยที่สามารถบ่งชี้สภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Oil quality factor) ปัจจัยด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า (Age factor) ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า (Visual

inspection factor) ปัจจัยด้านค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Insulation factor) และปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load factor) สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

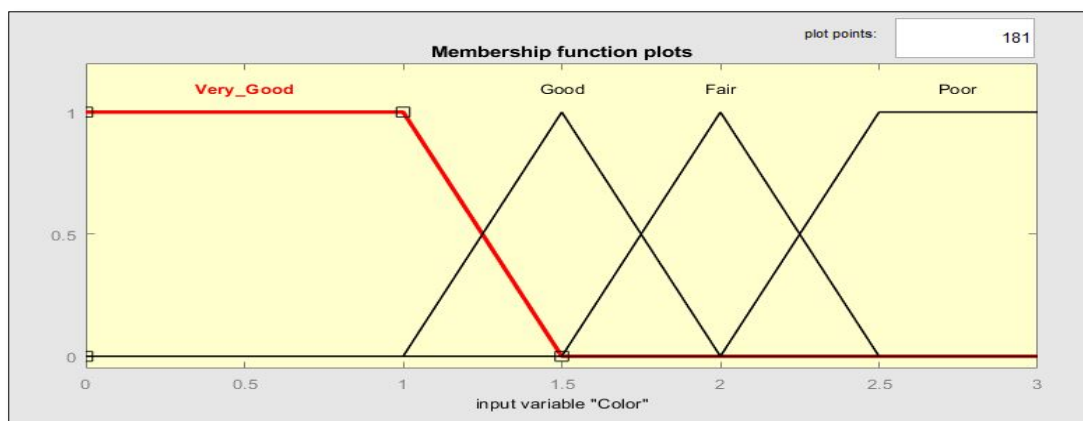
#### 4.1.1 ผลการออกแบบปัจจัยด้านคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าจากการกำหนดฟังก์ชันความสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) และฟังก์ชันความสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) จากการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกได้จากค่าสูงสุดของผลทดสอบช่วงนั้น และค่าผลทดสอบต่ำสุดของช่วงถัดไปตามตารางที่ 3-1 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-2



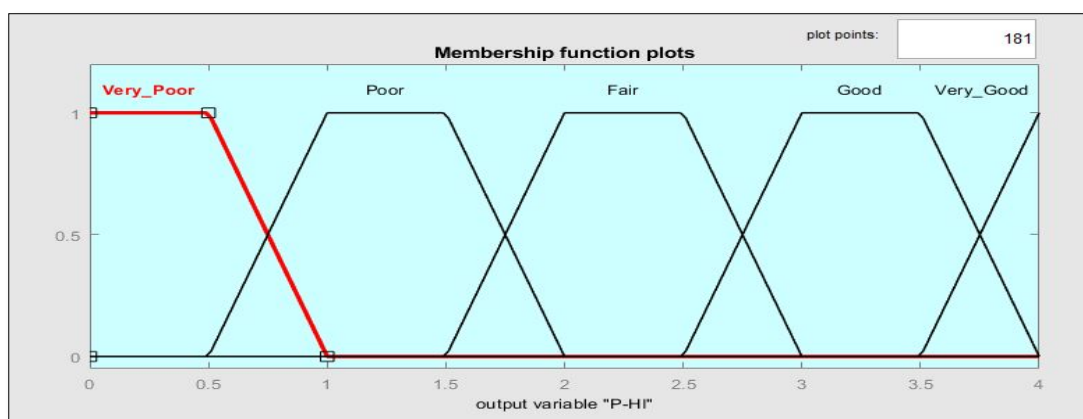
ภาพประกอบ 4-2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าจากการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) และฟังก์ชันความสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) โดยกำหนดระดับความเป็นสมาชิกได้จากค่าสูงสุดของผลทดสอบช่วงนั้น และค่าผลทดสอบต่ำสุดของช่วงถัดไปตามตารางที่ 3-2 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-3



ภาพประกอบ 4-3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าคุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

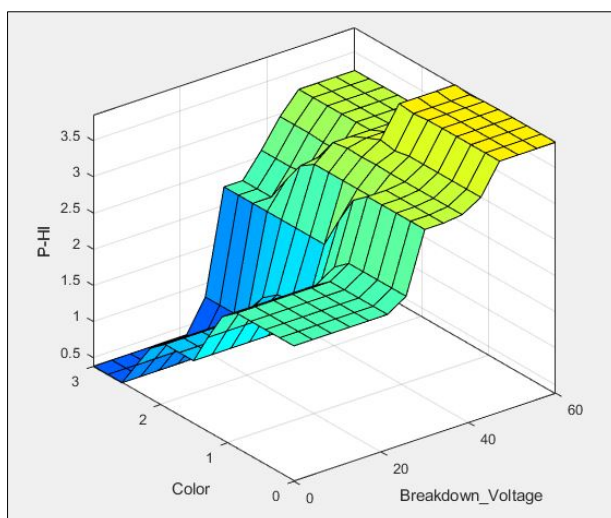
- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ได้จากการกำหนดฟังก์ชันความสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-3 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-4 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า คุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า กำหนดจากการคำนวณหาค่า OQF ที่มีค่าน้ำหนักของความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 4 คุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2 จะสามารถสร้างกฎฟuzzyแบบ Mamdani ได้จำนวน 16 กฎ ตามตารางที่ 4-1 และผลกราฟฟuzzyตามภาพประกอบ 4-5



ภาพประกอบ 4-4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 4-1 กฎฟัซซีของค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า คุณภาพสีของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

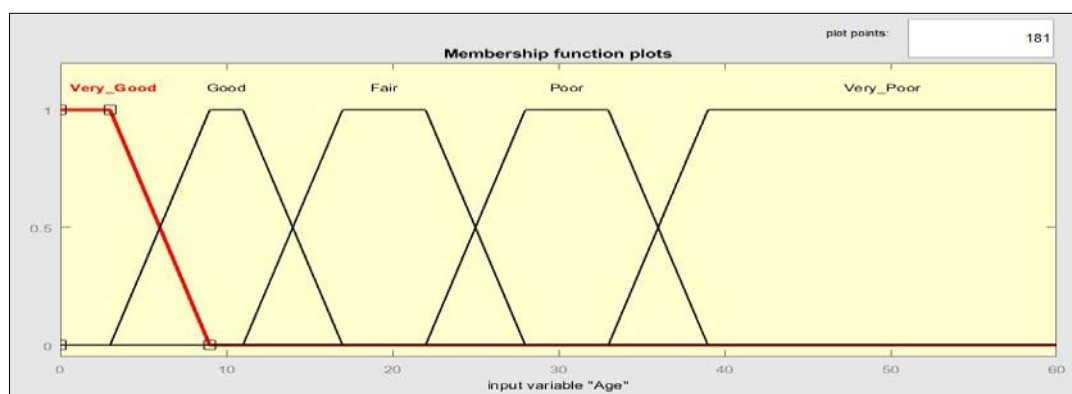
กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟัซซีแบบ Mamdani
1	If (Breakdown_Voltage is Very_Good) and (Color is Very_Good) then (P-HI is Very_Good)
2	If (Breakdown_Voltage is Very_Good) and (Color is Good) then (P-HI is Very_Good)
3	If (Breakdown_Voltage is Very_Good) and (Color is Fair) then (P-HI is Good)
4	If (Breakdown_Voltage is Very_Good) and (Color is Poor) then (P-HI is Good)
5	If (Breakdown_Voltage is Good) and (Color is Very_Good) then (P-HI is Good)
6	If (Breakdown_Voltage is Good) and (Color is Good) then (P-HI is Good)
7	If (Breakdown_Voltage is Good) and (Color is Fair) then (P-HI is Good)
8	If (Breakdown_Voltage is Good) and (Color is Poor) then (P-HI is Fair)
9	If (Breakdown_Voltage is Fair) and (Color is Very_Good) then (P-HI is Good)
10	If (Breakdown_Voltage is Fair) and (Color is Good) then (P-HI is Fair)
11	If (Breakdown_Voltage is Fair) and (Color is Fair) then (P-HI is Fair)
12	If (Breakdown_Voltage is Fair) and (Color is Poor) then (P-HI is Fair)
13	If (Breakdown_Voltage is Poor) and (Color is Very_Good) then (P-HI is Fair)
14	If (Breakdown_Voltage is Poor) and (Color is Good) then (P-HI is Poor)
15	If (Breakdown_Voltage is Poor) and (Color is Fair) then (P-HI is Poor)
16	If (Breakdown_Voltage is Poor) and (Color is Poor) then (P-HI is Very_Poor)



ภาพประกอบ 4-5 กราฟกฎฟัซซีของค่าคุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 4.1.2 ผลการออกแบบปัจจัยด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า

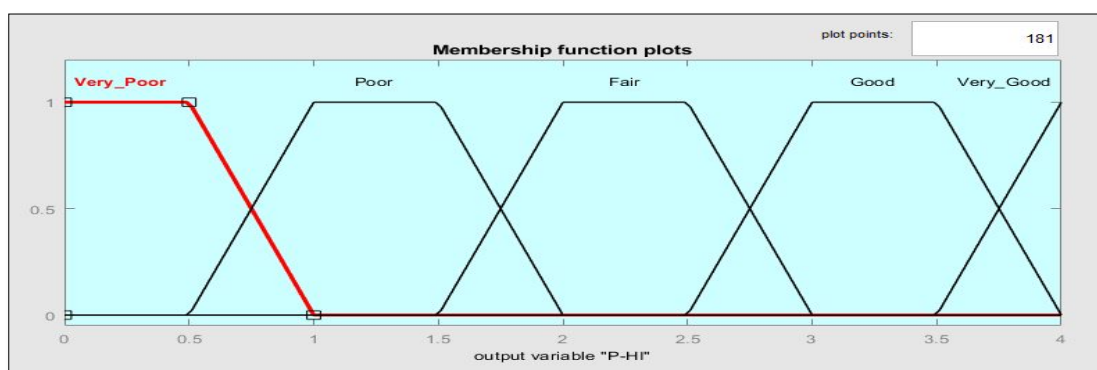
- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเริ่มกำหนดระยะเวลาของอายุ ณ วันที่ติดตั้งใช้งาน จนถึงวันที่ทำการประเมินสภาพมาใช้ในการออกแบบปัจจัยด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการกำหนดฟังก์ชันความสัมพันธ์คางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-4 โดยกำหนดระดับค่าความเป็นสมาชิกในช่วง 6 ปี ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-6



ภาพประกอบ 4-6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า ได้จากการกำหนดฟังก์ชันความสัมพันธ์คางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-5 ได้ผลการออกแบบตาม

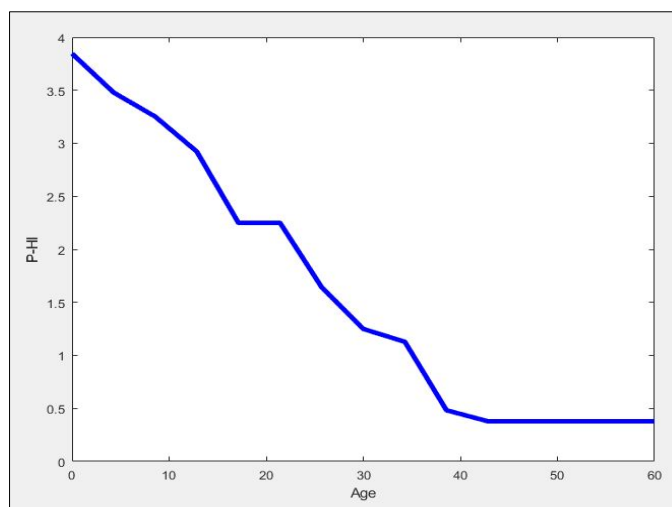
ภาพประกอบ 4-7 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า กับค่าระดับสภาพ หม้อแปลงไฟฟ้าของอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่กำหนดจากระบบกฎฟัซซีแบบ Mamdani จำนวน 5 กฎ ตามตารางที่ 4-2 และผลกราฟกฎฟัซซีตามภาพประกอบ 4-8



ภาพประกอบ 4-7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 4-2 กฎฟัซซีของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า และเอาต์พุตของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า

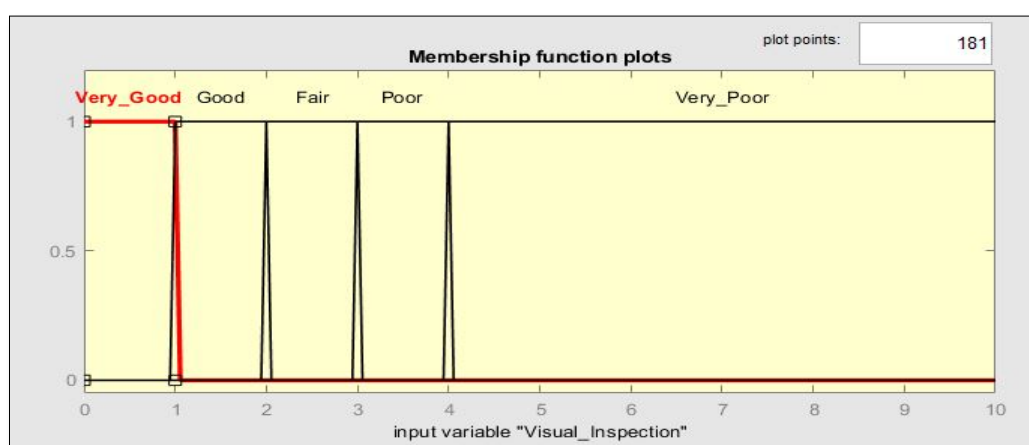
กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟัซซีแบบ Mamdani
1	If (Age is Very_Good) then (P-HI is Very_Good)
2	If (Age is Good) then (P-HI is Good)
3	If (Age is Fair) then (P-HI is Fair)
4	If (Age is Poor) then (P-HI is Poor)
5	If (Age is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)



ภาพประกอบ 4-8 กราฟฟังก์ชันของค่าอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า

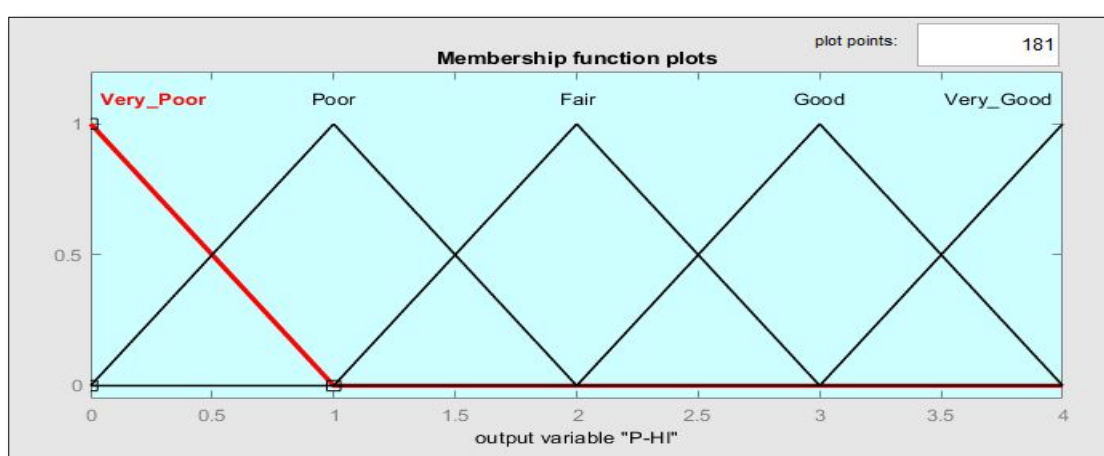
#### 4.1.3 ผลการออกแบบปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า จากการตรวจสอบตามแบบการบำรุงรักษาของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทั้งสิ้น 8 รายการ กำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยม (Rectangular Membership function) ของแต่ละช่วงที่ได้จากการตรวจสอบตามตารางที่ 3-6 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-9



ภาพประกอบ 4-9 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า ได้จากการกำหนดฟังก์ชันความสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) ตามตารางที่ 3-7 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-10 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลง กับค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า กำหนดจากระบบกฎฟัซซีแบบ Mamdani จำนวน 5 กฎ ตามตารางที่ 4-3 และผลกราฟฟัซซีตามภาพประกอบ 4-11

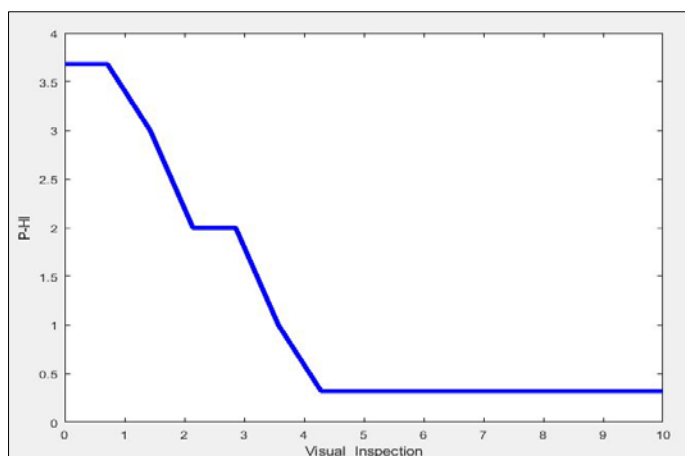


ภาพประกอบ 4-10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 4-3 กฎฟัซซีของค่าการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟัซซีแบบ Mamdani
1	If (Visual_Inspection is Very_Good) then (P-HI is Very_Good)
2	If (Visual_Inspection is Good) then (P-HI is Good)
3	If (Visual_Inspection is Fair) then (P-HI is Fair)
4	If (Visual_Inspection is Poor) then (P-HI is Poor)
5	If (Visual_Inspection is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)



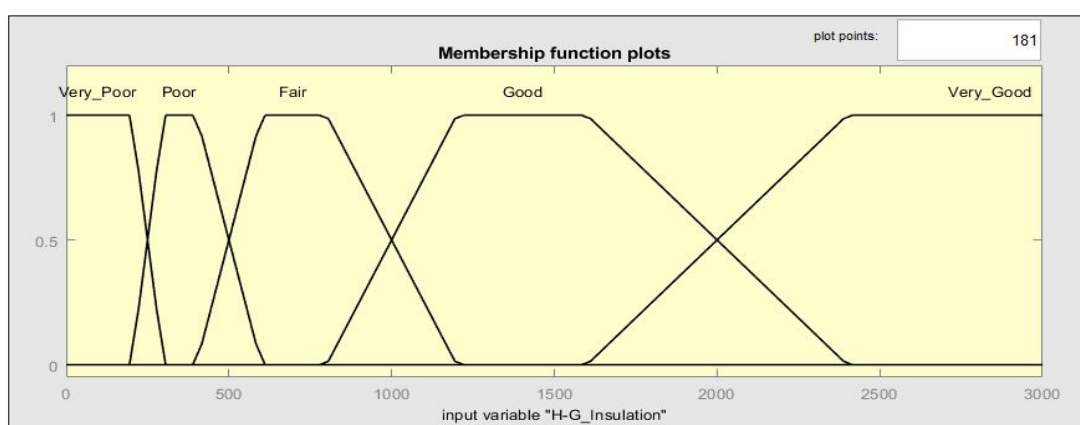


ภาพประกอบ 4-11 กราฟฟังก์ชันซีของการตรวจสอบความผิดปกติของสภาพภายนอกหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 4.1.4 ผลการออกแบบปัจจัยด้านค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

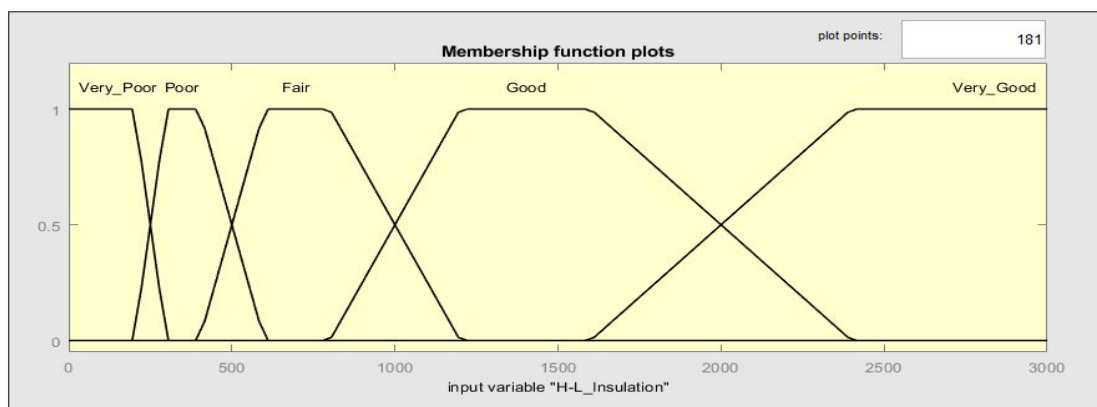
การออกแบบการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการวัดค่าระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ และขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ สามารถออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ได้ดังนี้

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์ จากการกำหนดฟังก์ชันความสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-8 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-12



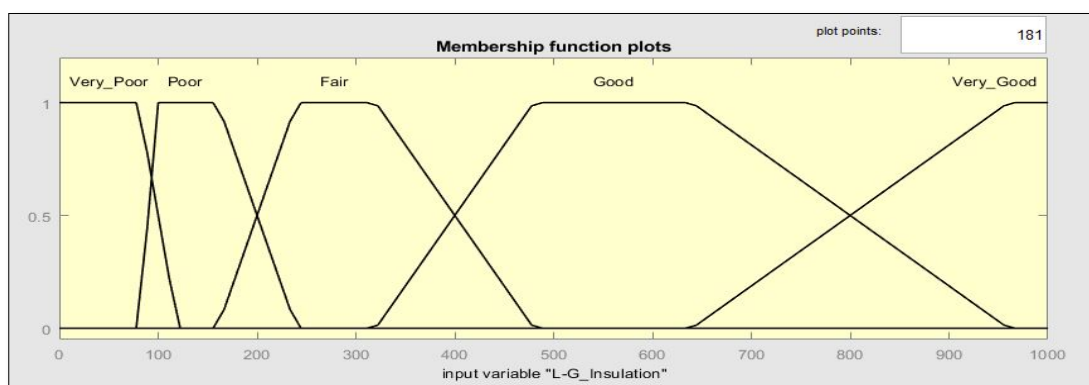
ภาพประกอบ 4-12 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ จากการกำหนดฟังก์ชันความสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-8 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-13



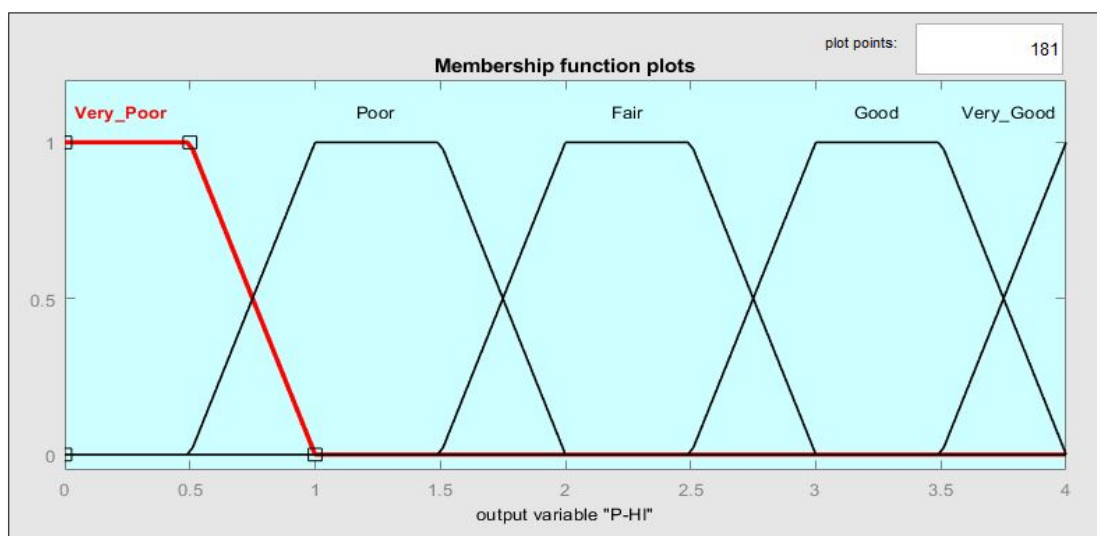
ภาพประกอบ 4-13 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ จากการกำหนดฟังก์ชันความสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-8 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-14

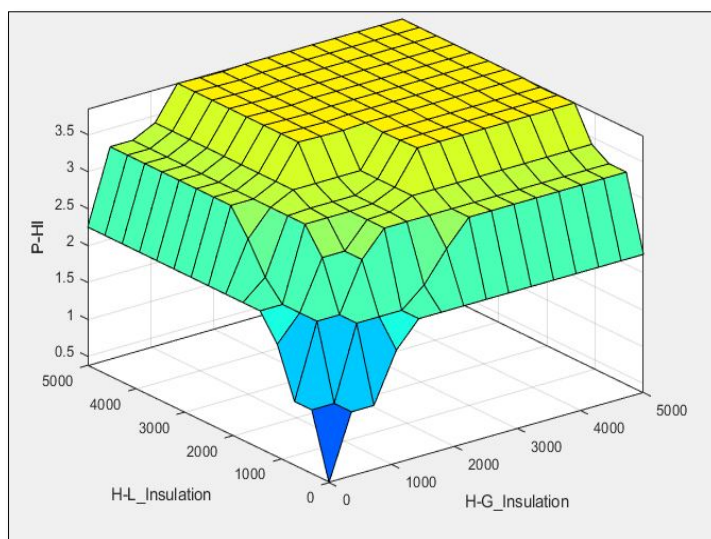


ภาพประกอบ 4-14 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงต่ำกับกราวด์

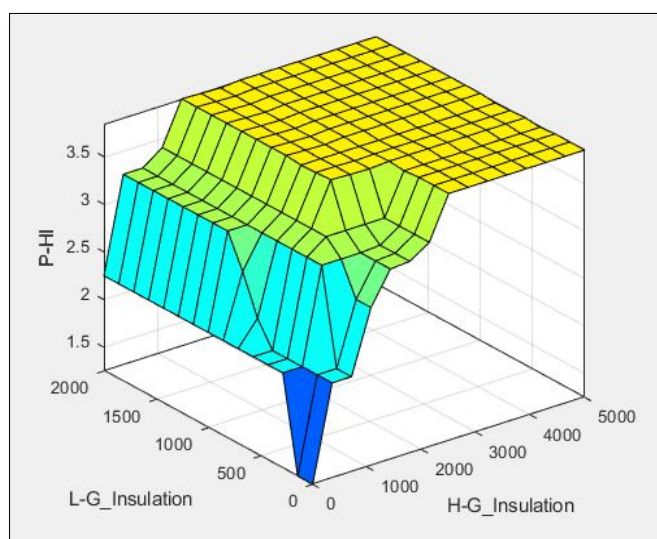
- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ได้จากการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-9 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-15 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า กำหนดจากการคำนวณหาค่า *Ins* ที่มีค่าน้ำหนักของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับกราวด์มีค่าเท่ากับ 4 ค่าน้ำหนักของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำมีค่าเท่ากับ 4 และค่าน้ำหนักของค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับกราวด์มีค่าเท่ากับ 2 จะสามารถสร้างกฎฟuzzy แบบ Mamdani ได้จำนวน 125 กฎ ตามรายละเอียดในภาคผนวก ก และผลกราฟฟuzzy ตามภาพประกอบ 4-16 ถึง 4-17



ภาพประกอบ 4-15 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพประกอบ 4-16 กราฟฟังก์ชันซี้ของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า



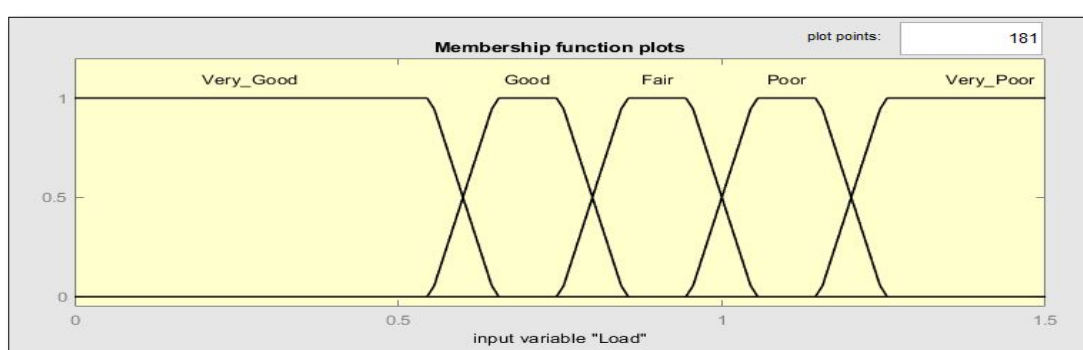
ภาพประกอบ 4-17 กราฟฟังก์ชันซี้ของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 4.1.5 ผลการออกแบบปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load factor)

การออกแบบปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load factor) โดยการออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของอัตราการจ่ายโหลด และค่าอินพุตที่ได้จากการรับโหลดแต่ละเดือน และนำค่าเอาต์พุตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

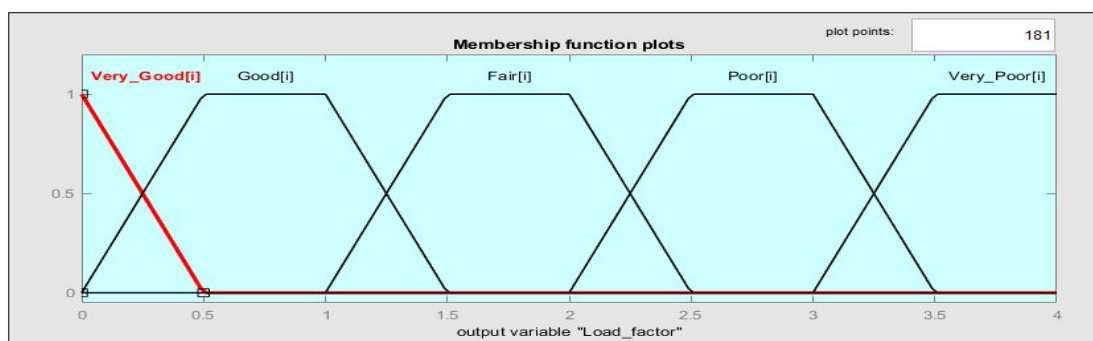
(Membership function) ของอัตราการจ่ายโหลดไปเป็นค่าอินพุตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ออกแบบภาวะการณ์รับโหลด (Load factor : LF) เพื่อกำหนดระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของอัตราการจ่ายโหลด จากการกำหนดฟังก์ชันความสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) โดยกำหนดระดับความเป็นสมาชิกได้จากค่าสูงสุดของผลทดสอบช่วงนั้น และค่าผลทดสอบต่ำสุดของช่วง ถัดไปได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-18



ภาพประกอบ 4-18 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราการจ่ายโหลด

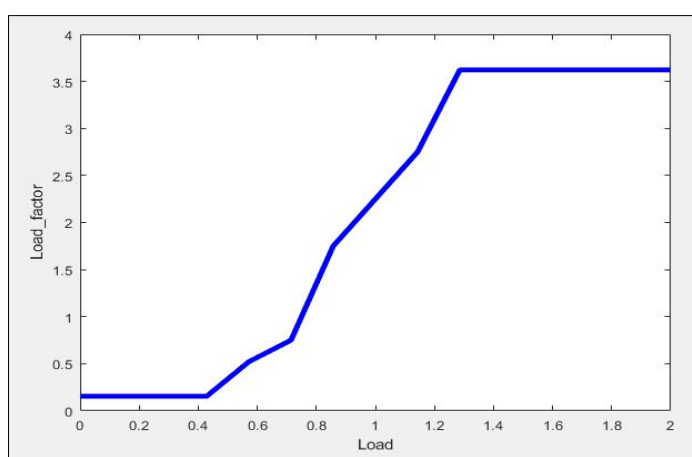
- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด ได้จากการกำหนดฟังก์ชันความสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-10 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-19 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราการจ่ายโหลด กับค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด กำหนดจากการคำนวณหาตามสมการ 3-3 จะสามารถสร้างกฎฟuzzyแบบ Mamdani ได้จำนวน 5 กฎ ตามตารางที่ 4-4 และผลกราฟฟuzzyตามภาพประกอบ 4-20



ภาพประกอบ 4-19 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด

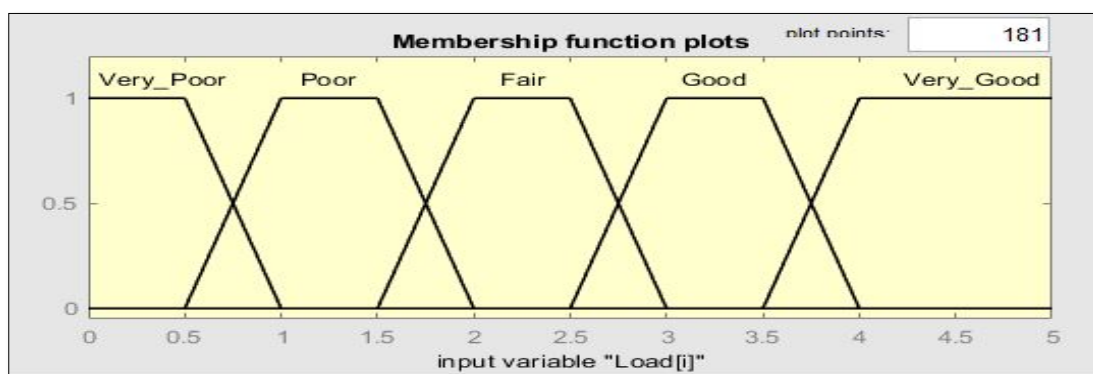
ตารางที่ 4-4 กฎฟuzzyของอัตราการจ่ายโหลด กับค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
1	If (Load is Very_Poor) then (Load_factor is Very_Poor[i])
2	If (Load is Poor) then (Load_factor is Poor[i])
3	If (Load is Fair) then (Load_factor is Fair[i])
4	If (Load is Good) then (Load_factor is Good[i])
5	If (Load is Very_Good) then (Load_factor is Very_Good[i])



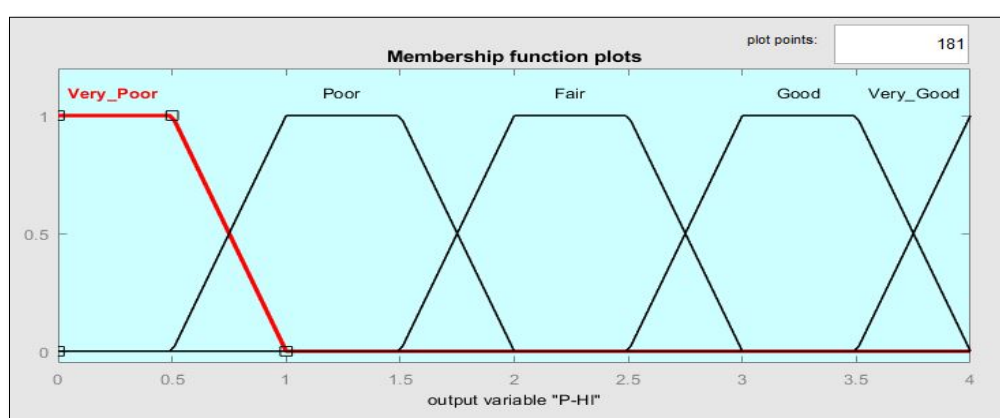
ภาพประกอบ 4-20 กราฟกฎฟuzzyของอัตราการจ่ายโหลด กับค่าระดับสภาพอัตราการจ่ายโหลด

- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของการประเมินค่าภาวการณ์รับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-21



ภาพประกอบ 4-21 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการประเมินค่าภาวการณ์รับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

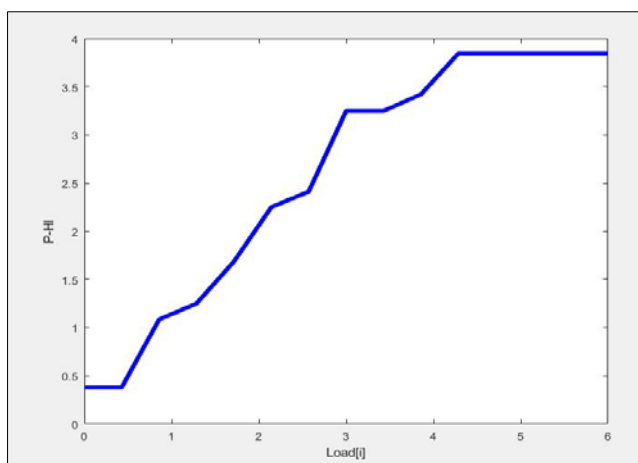
- ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด จากการกำหนดฟังก์ชันความสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) ตามตารางที่ 3-11 ได้ผลการออกแบบตามภาพประกอบ 4-22 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการประเมินค่าภาวการณ์รับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า กับระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด กำหนดจากการคำนวณหาตามสมการ 3-4 จะสามารถสร้างกฎฟัซซีแบบ Mamdani ได้จำนวน 5 กฎ ตามตารางที่ 4-5 และผลกราฟกฎฟัซซีตามภาพประกอบ 4-23



ภาพประกอบ 4-22 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด

ตารางที่ 4-5 กฎฟัซซีของการประเมินค่าภาวการณ์รับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า กับระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟัซซีแบบ Mamdani
1	If (Load[i] is Very_Good) then (P-HI is Very_Good)
2	If (Load[i] is Good) then (P-HI is Good)
3	If (Load[i] is Fair) then (P-HI is Fair)
4	If (Load[i] is Poor) then (P-HI is Poor)
5	If (Load[i] is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)



ภาพประกอบ 4-23 กราฟกฎพีชซีของการประเมินค่าภาวะการรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้า กับระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับภาระโหลด

#### 4.2 ผลการกำหนดค่าน้ำหนักของทั้ง 5 ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการออกแบบค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการเก็บข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าย้อนหลังตามอายุการใช้งานที่คาดการณ์สามารถใช้งานได้เพื่อสามารถกำหนดระดับของสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 ระดับ จำนวน 150 ข้อมูล (รายละเอียดตามภาคผนวก ก) ที่ผ่านการตัดสินใจตามผลการออกแบบหัวข้อ 4.1 และทำการปรับฐานของข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0-1 (Normalize) ตามตารางที่ 3-15 (รายละเอียดตามภาคผนวก ก) ด้วยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks : ANN) ตามสมการที่ 3-6 และฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ (Sigmoid Activation Function) ตามสมการที่ 3-7 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและคำนวณโดยใช้โปรแกรมภาษา Python – Jupyter Notebook ตามรายละเอียดคำสั่งในภาคผนวก ก ตามการออกแบบกำหนดจำนวนค่าน้ำหนักเริ่มต้นตามตารางที่ 4-6 ค่าอคติ  $b$  เท่ากับ 0 อัตราการเรียนรู้  $\alpha$  เท่ากับ 0.1 จำนวนรอบการเรียนรู้  $k$  จำนวน 1,000,000 รอบ และค่าคงที่โมเมนตัม  $\eta$  เท่ากับ 1 ผลการคำนวณพบว่าได้ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยตามตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-6 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละปัจจัยสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัย	ค่าน้ำหนัก
คุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	6
อายุของหม้อแปลงไฟฟ้า	5
การตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า	9



ตารางที่ 4-6 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นของแต่ละปัจจัยสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

ปัจจัย	ค่าน้ำหนัก
ความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า	6
การรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า	10

ตารางที่ 4-7 ค่าน้ำหนักขั้นสุดท้ายของแต่ละปัจจัยสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัย	ค่าน้ำหนัก
คุณภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า	0.1324
อายุของหม้อแปลงไฟฟ้า	0.2482
การตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า	0.1084
ความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า	0.4791
การรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า	0.0319

#### 4.3 ผลการทดสอบและการประเมินผลการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการทดสอบและการประเมินการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากการนำข้อมูลชุดฝึกอบรม (Train) จำนวน 150 ตัวอย่าง มาทดสอบในระบบประเมินตามที่ออกแบบ พบว่าสามารถประเมินได้ถูกต้องตรงตามสภาพจริงจำนวน 116 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 77.33% และจากการนำผลการบำรุงรักษาของหม้อแปลงไฟฟ้าชุดทดสอบความถูกต้อง (Test) จำนวน 30 ตัวอย่าง มาป้อนเข้าระบบประเมินตามภาพประกอบ 4-24 ที่ได้ออกแบบค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละปัจจัยตามข้อ 4.1 การกำหนดน้ำหนักของแต่ละปัจจัยตามตารางที่ 4-7 ครั้งละ 1 ข้อมูลหรือ 1 เครื่อง เพื่อให้ระบบประเมินสภาพหาค่าดัชนีสุขภาพ (HI) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- นำข้อมูลผลการบำรุงรักษาประกอบไปด้วย ค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าสีของน้ำมันหม้อแปลง อายุการใช้งาน จำนวนที่พบความผิดปกติจากการตรวจสอบสภาพภายนอก ค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูง-กราวด์ ค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูง-แรงต่ำ ค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงต่ำ-กราวด์ และการรับภาระโหลด มาป้อนเป็นข้อมูลเข้าในระบบ

- ระบบประเมินจะทำการตัดสินใจแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) ตามที่ออกแบบไว้ตามข้อ 4.1 โดยการรวมค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าสีของน้ำมันหม้อแปลงเป็นปัจจัยด้านคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า อายุการใช้งานเป็นปัจจัยด้านอายุ จำนวนที่พบความผิดปกติจากการตรวจสอบสภาพภายนอกเป็นปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพ

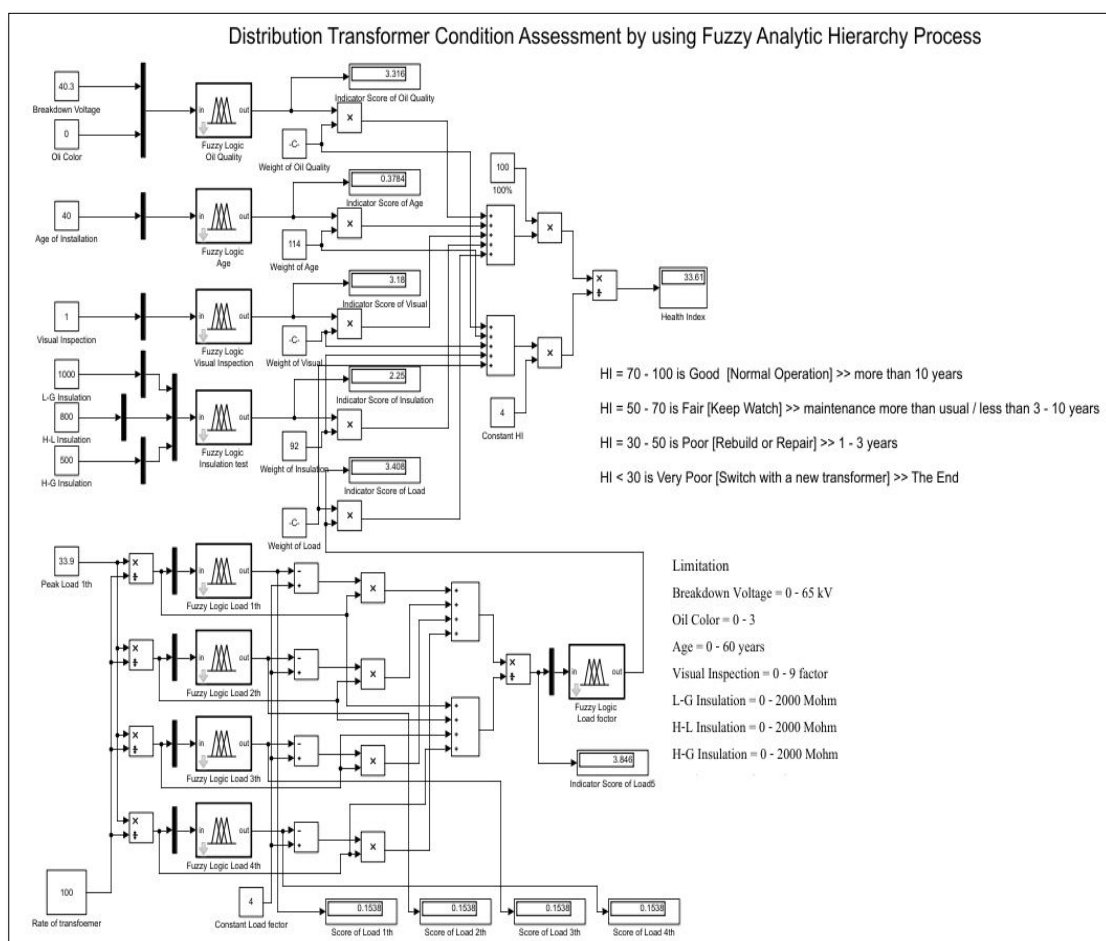
ภายนอก ค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูง-กราวด์ ค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูง-แรงต่ำ ค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงต่ำ-กราวด์ รวมเป็นปัจจัยด้านความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า และค่าการรับภาระโหลดเป็นปัจจัยการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทั้ง 5 ปัจจัยจะมีเอชท์พุดของการตัดสินใจที่มีค่าระหว่าง 0-4

3. นำค่าเอชท์พุดจากการตัดสินใจไปคำนวณหาค่าดัชนีสุขภาพ (HI) ตามสมการที่ 3-6 โดยใช้ค่าน้ำหนักที่คำนวณได้จากชุดฝึกอบรม (Train) ตามตารางที่ 4-7 ซึ่งจะได้ค่าดัชนีสุขภาพ (HI) ที่มีค่าระหว่าง 0-100

4. นำค่าดัชนีสุขภาพ (HI) ไปเทียบช่วงดัชนีสุขภาพตามตารางที่ 3-14 จะได้สภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่ประเมินได้จากระบบประเมิน

5. นำสภาพที่ได้จากระบบประเมินเทียบกับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจริงที่เก็บข้อมูลได้

6. นำข้อมูลลำดับถัดไป หรือเครื่องถัดไปมาป้อนเข้าระบบประเมินจนครบ 30 ตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบประเมินที่ออกแบบตามสมการที่ 3-8



ภาพประกอบ 4-24 ระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการหาค่าความถูกต้อง (Accuracy) พบว่า จากตัวอย่าง 30 ตัวอย่างสามารถประเมินสภาพได้ตามสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจริงจำนวน 25 ตัวอย่าง คิดเป็นความถูกต้อง 83.33% โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 4-8

$$\% \text{Accuracy} = \frac{|5 - 30|}{30} \times 100$$

$$\% \text{Accuracy} = 83.33\%$$

ตารางที่ 4-8 รายละเอียดผลทดสอบความถูกต้องของระบบประเมินจากชุดทดสอบ 30 ตัวอย่าง

ที่	Oil		Age	Visual	Winding insulation (MΩ)			Load (%)	Condition			Result
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		HI (%)	Fuzzy	TRUE	
1	18.2	3	29	3	200	400	400	65.3	20.8	แย่มาก	แย่มาก	✓
2	36.8	1	7	0	2000	2000	2000	42.2	89.9	ดี	ดี	✓
3	43.5	0	2	0	2000	2000	2000	45.1	94.2	ดี	ดี	✓
4	36.5	1	24	1	1200	1000	1000	41.4	66.8	ยอม รับได้	ยอม รับได้	✓
5	37.4	1	28	1	1600	1200	1200	68.6	68.6	ยอม รับได้	ยอม รับได้	✓
6	21.9	2	42	2	500	500	200	59.1	26.9	แย่มาก	แย่มาก	✓
7	29.1	1	32	1	500	500	200	54.4	40.3	แย่มาก	แย่มาก	✓
8	31.5	1	30	2	900	600	400	37.5	52.4	แย่มาก	แย่มาก	✓
9	41.8	0	5	1	2000	2000	2000	40.6	89.6	ดี	ดี	✓
10	31.4	1	31	2	1200	800	800	60.4	54.8	ยอม รับได้	แย่มาก	X
11	27.9	2	24	1	1800	1800	1600	53.9	68.7	ยอม รับได้	ยอม รับได้	✓

ตารางที่ 4-8 รายละเอียดผลทดสอบความถูกต้องของระบบประเมินจากชุดทดสอบ 30 ตัวอย่าง (ต่อ)

ที่	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition			Result
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		HI (%)	Fuzzy	TRUE	
12	28.9	1	31	1	1500	1500	1200	33.9	67.9	ยอม รับได้	ยอม รับได้	✓
13	32.1	1	24	3	1500	1600	1600	63.2	68.1	ยอม รับได้	ยอม รับได้	✓
14	26.1	2	38	2	500	400	200	54.2	22.7	แย่มาก	แย่มาก	✓
15	41.3	0	11	0	2000	1800	1800	58.4	82.2	ดี	ดี	✓
16	42.7	0	10	0	1800	1800	1500	60.2	82.4	ดี	ดี	✓
17	24.5	2	31	2	1400	1000	1000	55.6	54.2	ยอม รับได้	แย่มาก	✗
18	28.6	1	40	2	1200	800	800	48.9	48.8	แย่มาก	แย่มาก	✓
19	30.1	1	39	2	1100	800	500	49.6	49.1	แย่มาก	แย่มาก	✓
20	25.9	1	32	1	1100	500	500	59.1	48.1	แย่มาก	แย่มาก	✓
21	43.7	0	6	0	2000	2000	2000	48.8	91.0	ดี	ดี	✓
22	28.4	2	27	3	1400	1100	1000	71.3	56.7	ยอม รับได้	แย่มาก	✗
23	22.4	2	37	2	1000	500	500	67.9	39.3	แย่มาก	แย่มาก	✗
24	31.9	1	21	1	2000	2000	2000	61.6	81.9	ดี	ดี	✓
25	24.3	1	33	3	400	400	200	59.4	27.0	แย่มาก	แย่มาก	✓
26	24.3	2	36	2	700	500	500	45.3	40.3	แย่มาก	แย่มาก	✗
27	23.1	2	41	2	400	400	200	59.6	21.0	แย่มาก	แย่มาก	✓
28	26.2	1	40	2	500	400	200	40.5	24.7	แย่มาก	แย่มาก	✓

ตารางที่ 4-8 รายละเอียดผลทดสอบความถูกต้องของระบบประเมินจากชุดทดสอบ 30 ตัวอย่าง (ต่อ)

ที่	Oil		Age	Visual	Winding insulation (MΩ)			Load (%)	Condition			Result
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		HI (%)	Fuzzy	TRUE	
29	18.6	3	42	3	400	400	200	44.2	15.5	แย่มาก	แย่มาก	✓
30	35.5	1	18	0	1500	1300	1200	42.8	76.3	ดี	ดี	✓

#### 4.4 อภิปรายผลการศึกษา

ผลการประเมินสภาพที่ได้จากระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ที่ 0-100% ซึ่งแต่ละช่วงของค่าประเมินที่ได้จะบ่งบอกระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า โดยสามารถวางแผนการบำรุงรักษาจากผลการประเมินได้ดังนี้

- ระดับสภาพแย่มาก หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการสับเปลี่ยนทดแทนด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องใหม่โดยเร็วที่สุด หรือเป็นหม้อแปลงกลุ่มแรกที่จะพิจารณาบำรุงรักษา เนื่องจากมีสภาพพร้อมที่จะเกิดการเสียหายหรือชำรุดได้ตลอดเวลา

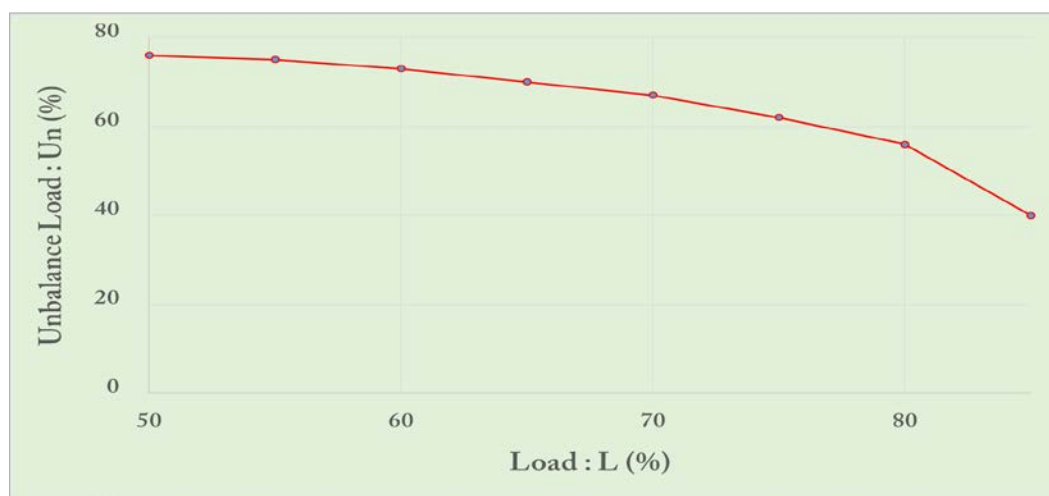
- ระดับสภาพแย่มาก หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการรื้อถอนนำลงมาซ่อมแซมได้แก่ การเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า การอบขจัดความชื้น การเปลี่ยนซิลยาง บุชชิ่ง เป็นต้น หรือเป็นหม้อแปลงกลุ่มที่ 2 หรือรองจากกลุ่มระดับแย่มากที่จะพิจารณาบำรุงรักษา เนื่องจากสภาพมีแนวโน้มที่จะนำไปสู่การเสียหายหรือชำรุด

- ระดับสภาพยอมรับได้ หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการเฝ้าระวัง และมีจำนวนครั้งการเข้าบำรุงรักษามากกว่าปกติ แต่อาจจะยังไม่จำเป็นต้องรื้อถอนนำลงมาซ่อมแซม หรือสับเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้า หรือเป็นหม้อแปลงกลุ่มที่ 3 หรือรองจากกลุ่มระดับแย่มาก และแย่มากที่จะพิจารณาบำรุงรักษา เนื่องจากมีส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าเริ่มมีการเสื่อมสภาพ หรือมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างนาน

- ระดับสภาพดี หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการบำรุงรักษาตามแผนงานปกติ หรือเป็นหม้อแปลงกลุ่มสุดท้ายในการพิจารณาบำรุงรักษา เนื่องจากสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ายังไม่พบการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบต่าง ๆ หรือมีอายุการใช้งานน้อย

อีกทั้งระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบให้ผลการประเมินในรูปแบบ 0 – 100% จึงสามารถจัดลำดับความสำคัญของแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการเรียงลำดับจากค่าน้อยไปยังค่ามากได้อีกวิธีหนึ่ง

ทั้งนี้ การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในการหาน้ำหนักของแต่ละปัจจัยสำหรับการประเมินสภาพ พบว่าปัจจัยด้านค่าความเป็นฉนวนของขดลวดมีผลต่อสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ามากที่สุดในการประเมิน ซึ่งการเสื่อมสภาพเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากการรับโหลด หรือการจ่ายโหลดไม่สมดุล การบำรุงรักษาจึงควรให้ความสำคัญกับการตรวจสอบสภาพของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า รวมไปถึงออกแบบให้หม้อแปลงไฟฟ้ารับโหลดให้เหมาะสม และมีความสมดุลในแต่ละเฟส ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการรับโหลด และการจ่ายโหลดไม่สมดุล ที่หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถรับภาระได้ โดยไม่ทำให้อุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่ออกแบบสำหรับการใช้งานเป็นไปตามภาพประกอบ 4-25



ภาพประกอบ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับโหลด และการจ่ายโหลดไม่สมดุล

ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมตามรายละเอียดแสดงไว้ในผลงานวิชาการภาคผนวก ข และปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีผลต่อสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าน้อยที่สุด เนื่องจากภาระโหลดมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปมาได้ตลอดเวลา ส่งผลให้ขณะทำการบำรุงรักษาค่าที่วัดได้ อาจจะไม่ใช่ช่วงที่หม้อแปลงไฟฟ้ารับโหลดสูงสุด

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการจัดทำระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV จากปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยได้แก่ ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจัยด้านอายุของหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจัยด้านการตรวจสอบสภาพภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจัยด้านค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า และปัจจัยด้านการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า จากรายการผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อสามารถระบุระดับสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปสู่การจัดลำดับเข้าบำรุงรักษาหรือสับเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป

ในการวิจัยระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ด้วยฟuzzyลอจิกครั้งนี้ สามารถวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา เป็น 2 ส่วน ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อสามารถลดจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าชำรุด และสามารถวางแผนการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ด้วยการนำแนวทางการตัดสินใจแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟuzzyลอจิกมาออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 5 ปัจจัย จากข้อมูลผลการบำรุงรักษาในฟังก์ชันรูปแบบฟังก์ชันความสมาชิกสามเหลี่ยม (Triangular Membership function) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership function) รวมไปถึงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของแต่ละปัจจัย ที่ได้ปรับเปลี่ยนค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละกลุ่ม เพื่อให้ค่าเอาต์พุตที่จะนำไปประเมินสภาพได้ค่าที่เหมาะสมตามที่เสนอในบทที่ 3 และ 4 โดยกำหนดน้ำหนักของแต่ละปัจจัยเป็นไปตามตารางที่ 4-7 ที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) จากข้อมูลจำนวน 150 ตัวอย่าง ผลการทดสอบและการประเมินการออกแบบระบบประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า จากการนำข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบจำนวน 30 ตัวอย่าง มาป้อนเข้าระบบประเมินที่ออกแบบ แล้วนำค่าระดับสภาพที่ระบบประเมินได้ ซึ่งประกอบไปด้วย ระดับสภาพดี ยอมรับได้ แย่ และแย่มาก เทียบกับข้อมูลสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจริงของกลุ่มตัวอย่างทดสอบ เพื่อคำนวณหาความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบ

ประเมินที่ออกแบบ พบว่า จากหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบตัวอย่าง 30 ตัวอย่าง สามารถประเมินสภาพได้ตามสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจริงจำนวน 25 ตัวอย่าง และมีความผิดพลาดจำนวน 5 ตัวอย่าง คิดเป็นความถูกต้อง 83.33% โดยสามารถนำไปวางแผนการบำรุงรักษาตามสภาพที่ได้จากผลการประเมินประกอบไปด้วย ระดับสภาพแย่มากหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการสับเปลี่ยนทดแทนด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องใหม่โดยเร็วที่สุดหรือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มแรกในลำดับความสำคัญของการบำรุงรักษา ระดับสภาพแย่มากหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการรื้อถอนนำลงมาซ่อมแซมหรือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มลำดับที่ 2 ในลำดับความสำคัญของการบำรุงรักษา ระดับสภาพยอมรับได้หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการเฝ้าระวัง หรือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มลำดับที่ 3 ในลำดับความสำคัญของการบำรุงรักษา ระดับสภาพดีหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้ควรได้รับการบำรุงรักษาตามแผนงานปกติ หรือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มสุดท้ายในลำดับความสำคัญของการบำรุงรักษา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในอดีตแบบเอกสาร (Hard Copy) ส่งผลให้ข้อมูลที่รวบรวมได้มีจำกัด จึงควรมีระบบจัดเก็บข้อมูล เพื่อจะได้มีข้อมูลในอนาคตเพิ่มเติมมากขึ้น และสามารถนำข้อมูลที่มีการจัดเก็บใหม่เพิ่มเติมมาพัฒนาระบบต่อไป เช่น การปรับค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยให้เหมาะสมมากขึ้น การปรับค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละปัจจัย ให้สอดคล้องกับข้อมูล ณ ขณะนั้น ซึ่งจะส่งผลให้ระบบประเมินสภาพมีความผิดพลาดลดลง และการวิจัยมุ่งเน้นการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ซึ่งระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยยังมีระบบแรงดันไฟฟ้าอีกหลายระบบ เช่น 22 kV 24 kV และ 19 kV การศึกษาครั้งถัดมาจะนำข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ ดังกล่าว มารวมพิจารณา ออกแบบ เพื่อให้ระบบประเมินสามารถใช้งานได้กว้างขึ้น และปัจจัยด้านการรับภาระโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีผลต่อสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าน้อยที่สุด เนื่องจากภาระโหลดมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปมาได้ตลอดเวลา ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตได้ในการออกแบบระบบประเมินที่ไม่พิจารณาปัจจัยด้านการรับโหลด เทียบกับการออกแบบครั้งนี้ที่พิจารณาปัจจัย ดังกล่าว ด้วย



### บรรณานุกรม

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2560). คู่มือการปฏิบัติงานบำรุงรักษาหม้อแปลงในระบบจำหน่ายของ กฟภ. ค้นจาก <https://intranet.pea.co.th>
- [2] คมกฤษณ์ จิตตวีระ และปานจิต คำรงกุลกำจร. (2560). ดัชนีวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังสำหรับบำรุงรักษาเชิงป้องกันของการไฟฟ้านครหลวงโดยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ แบบตรรกะคลุมเครือ. วารสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 30(100), 33-42.
- [3] พรจิต ประทุมสุวรรณ. (2561). การควบคุมแบบฟัชซีลอจิก (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ด ยูเคชั่น.
- [4] สิทธิพร ตระกูลไทย. (2559). การจัดสรรงบประมาณแบบเหมาะสมที่สุดสำหรับการบำรุงรักษา แบบป้องกันของระบบจำหน่ายไฟฟ้า. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [5] Ali Naderian Jahromi. At al. “An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 25, pp. 20-34, March/April 2009.
- [6] Atul Jaysing Patil, Arush Singh and R. K. Jarial., “Novel Fuzzy Based Technique For Transformer Health Index Computation”, IEEE International Conference on Advances in Computing, Communication and Control, India, December 21 , 2019.
- [7] Hagan, M. T.; Demuth, H. B. and Beale, M. 1996. Neural Network Design. Boston MA: PWS Publishing.
- [8] M.R.Ahmed, M.A. Geliel and A.Khali, “Power Transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic Technique Based on Dissolved Gas Analysis”, 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), Platani-Chania, Crete, Greece, June 25-28, 2013.

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

- [9] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara and Andres Melgar, “Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 101, pp. 215-229, 26 March 2019.
- [10] Muhammad Abdillah et al., “Prognostics Health Management (PHM) System for Power Transformer Using Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM)”, *The International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry*, Tangerang, Indonesia, September 28–29, 2020.
- [11] Omar M. Elmabrouk, Farag A. Masoud and Naji S. Abdelwanis., “Diagnosis of Power Transformer Faults using Fuzzy Logic Techniques Based on IEC Ratio Method”, *ICEMIS'20: Proceedings of the 6th International Conference on Engineering & MIS*, September, 2020.
- [12] David Granados-Lieberman et al., “Harmonic PMU and Fuzzy Logic for Online Detection of Short-Circuited Turns in Transformers”, *Electric Power System Research*, vol 190, pp 1-11, 2021.
- [13] Dejan Susa and Hasse Nordman. “IEC 60076–7 loading guide thermal model constants estimation”, *INTERNATIONAL TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS*, Wiley Online Library, 23, pp. 946-960, February 23, 2012.
- [14] Mohsen Savari Katooli and Amangaldi Koochaki. “Detection and Classification of Incipient Faults in Three-Phase Power Transformer Using DGA Information and Rule-based Machine Learning Method”, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 3, pp. 1251-1266, 2020.
- [15] S. Abdi, N. Harid, L. Safiddine, A. Boubakeur, and A. (Manu) Haddad, “The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach,” *Energies*, vol. 14, no. 8, p. 2089, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14082089.

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

- [16] Shuaibing Li and Haiying Dong. “Apparent Age Estimation Based on Probabilistic Health Index”, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, May 21-24, 2019.
- [17] Wang Jian et al., “The New Developed Health Index for Power Transformer Condition Assessment”, Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chengdu, China, June 4-7, 2020.
- [18] Winanda Riga Tamma, Rahman Azis Prasajo and Suwarno., “Assessment of High Voltage Power Transformer Aging Condition Based on Health Index Value Considering Its Apparent and Actual Age”, International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, Indonesia, Oct 6-8, 2020.
- [19] Wilasinee Wattakapaiboon and Norasage Pattanadech, “The New Developed Health Index for Transformer Condition Assessment”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Xi’an – China, 2016.
- [20] Xiaozhen Zhao et al. “Experimental Evaluation of Transformer Internal Fault Detection Based on V-I Characteristics”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol. 67, pp. 215-229, May 2019.

ภาคผนวก ก

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบและประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า กฏฟิสิกส์ของค่าความเป็นฉนวนของ  
ขดลวด และคำสั่งโปรแกรมภาษา Python – Jupyter Notebook

ตาราง ข้อมูลผลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าน้ำหนัก  
แต่ละปัจจัย

No.	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		
1	35.2	1	5	0	2000	2000	2000	36.3	ดี
2	34	1	6	0	2000	2000	2000	53.4	ดี
3	43.5	0	1	0	2000	2000	2000	38.1	ดี
4	33.9	1	6	1	2000	2000	2000	58.9	ดี
5	36	1	27	0	2000	2000	2000	21.7	ดี
6	40.8	0	3	0	2000	2000	2000	31.7	ดี
7	31.5	1	26	1	1150	900	600	18.1	ยอมรับได้
8	29.1	1	26	1	1200	1100	900	42.7	ยอมรับได้
9	36.6	1	13	0	2000	2000	2000	41	ดี
10	22.1	2	26	1	1300	1200	1100	13.1	แย้
11	26.2	1	26	1	1400	1100	500	18.6	ยอมรับได้
12	19.1	2	33	1	1100	500	600	23.6	แย้
13	32.3	1	37	1	900	600	500	36.7	แย้มาก
14	40.3	0	40	1	1000	800	500	33.9	แย้
15	39.2	1	28	1	1100	900	500	45.1	ยอมรับได้
16	26.4	1	28	1	1100	800	500	42.88	แย้
17	26	1	19	1	2000	2000	2000	44.8	ดี
18	18.1	3	10	0	2000	2000	1600	19.4	ยอมรับได้
19	17.4	3	20	0	1600	1500	1200	70.43	แย้
20	23.1	2	6	0	2000	2000	2000	27.3	ดี
21	48.9	0	6	0	2000	2000	2000	32.1	ดี
22	22.7	2	9	0	2000	2000	2000	40.9	ดี

ตาราง ข้อมูลผลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าน้ำหนัก  
แต่ละปัจจัย (ต่อ)

No.	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		
23	21.9	2	9	0	2000	2000	1800	30.4	ดี
24	15.9	3	24	1	1390	1100	1000	48.6	แย้
25	16.9	3	29	1	1200	1000	800	39.1	แย้
26	29	1	38	1	1100	800	600	31.2	แย้
27	15.6	3	30	1	1100	900	600	63.3	แย้
28	21.9	2	44	1	900	600	500	69.1	แย้มาก
29	25.5	1	6	0	2000	2000	2000	40.6	ดี
30	23	2	10	0	2000	2000	1600	60.2	ดี
31	21.1	2	28	1	1200	1000	600	35.2	แย้
32	19.5	2	28	1	1100	800	500	70.9	แย้
33	22	2	30	1	1100	900	600	30.6	แย้
34	41.2	0	6	0	2000	2000	2000	23.6	ดี
35	32.8	1	10	0	2000	2000	1600	31.8	ดี
36	37	1	10	0	2000	2000	1900	42.49	ดี
37	32.1	1	31	1	500	300	200	54.7	แย้มาก
38	34.5	1	27	1	1200	1000	800	41.4	ยอมรับได้
39	39.5	1	5	0	2000	2000	2000	36.1	ดี
40	57.9	0	19	0	1800	1800	1800	56.2	ดี
41	35	1	23	1	1800	1800	1800	40.9	ดี
42	41.7	0	5	0	2000	2000	2000	46.19	ดี
43	47.4	0	28	1	1600	1600	1800	38.6	ยอมรับได้

ตาราง ข้อมูลผลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าน้ำหนัก  
แต่ละปัจจัย (ต่อ)

No.	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		
44	28.5	1	19	0	2000	2000	2000	64.6	ดี
45	31.5	1	30	2	900	600	400	37.5	แย่มาก
46	30.4	1	25	1	1100	800	600	51.4	แย่
47	33.7	1	35	2	1600	1600	1200	45.2	ยอมรับได้
48	35	1	31	2	1100	800	500	34.46	แย่
49	34.3	1	28	1	1400	1100	900	30.8	ยอมรับได้
50	48.3	0	35	2	800	600	400	20.7	แย่มาก
51	40.3	0	1	0	2000	2000	2000	35.7	ดี
52	34.9	1	44	1	1000	600	300	47.2	แย่มาก
53	43.5	0	19	0	2000	2000	2000	46.8	ดี
54	18.2	3	44	2	600	600	300	33.9	แย่มาก
55	24.2	1	31	1	800	500	400	38.6	แย่มาก
56	19.1	3	29	2	600	500	300	44.8	แย่มาก
57	25.6	1	44	2	1400	1200	800	48.9	แย่
58	20.5	2	37	1	1200	1200	1000	40	แย่
59	23.2	2	36	1	600	600	200	68.1	แย่มาก
60	22.1	2	38	1	1400	1400	1400	56.6	แย่
61	20.5	2	31	2	900	800	400	57.2	แย่มาก
62	24.2	2	44	2	603	569	478	59.2	แย่มาก
63	22.7	2	20	2	900	700	500	57.6	แย่มาก
64	28.3	1	28	1	800	600	600	70.2	แย่มาก
65	40.6	0	25	1	300	210	110	40.2	แย่มาก

ตาราง ข้อมูลผลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าน้ำหนัก  
แต่ละปัจจัย (ต่อ)

No.	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		
66	38.7	1	37	1	1200	1000	600	41.7	ยอมรับได้
67	19.1	3	39	1	900	800	500	49.8	แย่มาก
68	27.4	1	37	1	1000	800	600	28.83	แย่มาก
69	24.9	2	26	1	1300	1100	1000	43.7	แย่
70	24.3	2	27	2	1400	1200	1000	42	แย่
71	22.1	2	26	1	1200	1100	600	58.6	แย่
72	22.1	2	24	1	1500	1100	1100	30.42	แย่
73	41.5	0	33	1	1400	1200	1000	20.7	ยอมรับได้
74	39.7	1	25	1	1600	1200	1100	36.7	ยอมรับได้
75	28	1	23	0	1600	1400	1200	59.2	ยอมรับได้
76	31.7	1	26	1	500	900	500	60.2	แย่มาก
77	27.9	1	27	1	1000	1000	1000	60.4	ยอมรับได้
78	30.5	1	17	2	400	400	100	35.9	แย่มาก
79	30.4	1	38	1	800	500	500	46.2	แย่มาก
80	53.3	0	42	2	400	380	212	69.6	แย่มาก
81	25	1	38	3	1000	1500	1200	45.2	แย่
82	25.6	1	43	2	500	400	200	40.8	แย่มาก
83	23.8	2	38	1	1000	1000	1000	53.1	แย่
84	18	3	44	3	400	400	200	34.2	แย่มาก
85	40.6	0	44	3	250	250	200	48.9	แย่มาก
86	27	1	27	1	1170	1080	193	36.4	แย่
87	26.6	1	28	1	1400	1100	1100	75.3	ยอมรับได้



ตาราง ข้อมูลผลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าน้ำหนัก  
แต่ละปัจจัย (ต่อ)

No.	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		
88	23.4	2	36	2	1100	800	600	72.6	แย่มาก
89	36.4	1	26	1	1400	1200	1100	26.6	ยอมรับได้
90	28.3	1	37	1	1100	900	600	42.8	แย่
91	34.9	1	17	0	1500	1300	1100	42.8	ดี
92	32.9	1	28	2	1200	1200	1000	60.4	ยอมรับได้
93	21.9	2	27	1	1800	1800	1600	53.9	ยอมรับได้
94	24.1	2	28	1	1800	1800	1400	47.1	ยอมรับได้
95	30.5	1	31	1	1400	1400	1000	39.26	ยอมรับได้
96	50.6	0	11	0	1800	1600	1500	40.3	ดี
97	47	0	28	1	1400	1100	1000	55.8	ยอมรับได้
98	46.1	0	24	1	1600	1300	1100	75.3	ยอมรับได้
99	40.9	0	6	0	2000	2000	2000	28.6	ดี
100	54.3	0	9	0	2000	2000	2000	30.1	ดี
101	28.3	1	8	1	400	550	350	39.4	แย่มาก
102	33.2	1	32	1	1800	1800	1600	51.3	ยอมรับได้
103	60.8	0	35	2	1600	1600	1600	42.5	ยอมรับได้
104	38.3	1	37	1	1800	1800	1600	20.8	ยอมรับได้
105	40.5	0	31	1	1800	1800	1600	30.5	ยอมรับได้
106	37.5	1	31	1	1600	1600	1200	40.7	ยอมรับได้
107	38.5	1	31	1	1600	1600	1400	41	ยอมรับได้
108	22.5	2	32	2	1600	1600	1400	45.6	แย่
109	25.1	1	44	1	1200	1200	1100	48.3	แย่

ตาราง ข้อมูลผลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าน้ำหนัก  
แต่ละปัจจัย (ต่อ)

No.	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		
110	27.2	1	26	1	1400	1400	1000	104.5	ยอมรับได้
111	26.1	1	35	1	1800	1800	1400	66.1	ยอมรับได้
112	25.7	1	33	2	1800	1800	1600	31.9	ยอมรับได้
113	24.2	2	26	1	1600	1600	1200	54.9	ยอมรับได้
114	21.1	2	19	0	2000	2000	2000	48.6	ยอมรับได้
115	43.8	0	6	1	2000	2000	2000	30.6	ดี
116	44.1	0	38	1	1100	900	500	44.63	แย่
117	29.9	1	31	1	1100	800	600	59.1	แย่
118	27.2	1	27	1	1200	1100	800	64.3	ยอมรับได้
119	21.8	2	31	1	1200	1000	800	50.8	แย่
120	25.4	1	29	1	1400	1200	1100	42.3	ยอมรับได้
121	21.6	2	27	1	1500	1300	1100	39.3	ยอมรับได้
122	42.5	0	11	0	2000	1800	1600	32.4	ดี
123	30.2	1	26	1	1400	1200	1000	36.5	ยอมรับได้
124	32.8	1	31	1	1200	1000	800	66.6	ยอมรับได้
125	46.7	0	11	0	1800	1600	1500	50.4	ดี
126	27	1	38	1	1000	800	500	48.4	แย่
127	20.9	2	14	0	1400	1200	1100	73.3	แย่
128	23.3	2	14	0	1500	1300	1100	55.2	ยอมรับได้
129	38.7	1	6	0	2000	2000	2000	38.5	ดี
130	36.4	1	32	1	1800	1800	1600	45.7	ยอมรับได้
131	31.7	1	26	1	1800	1800	1600	42.4	ยอมรับได้

ตาราง ข้อมูลผลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและค่าน้ำหนัก  
แต่ละปัจจัย (ต่อ)

No.	Oil		Age	Visual	Winding insulation (M $\Omega$ )			Load (%)	Condition
	BD	Color			H-G	H-L	L-G		
132	35.4	1	28	1	1800	1800	1400	50	ยอมรับได้
133	31.7	1	26	1	2000	2000	2000	62.5	ดี
134	35.9	1	28	1	1400	1100	900	30.5	ยอมรับได้
135	58.1	0	11	0	2000	1800	1600	40	ดี
136	43.6	0	23	0	1600	1400	1100	30.6	ยอมรับได้
137	43.3	0	36	2	1600	1600	1400	81.5	ยอมรับได้
138	38.6	1	24	2	1600	1600	1200	51.5	ยอมรับได้
139	29.5	1	37	1	1600	1600	1200	48.4	ยอมรับได้
140	39.5	1	24	2	1800	1800	1600	47.9	ยอมรับได้
141	37.6	1	8	0	2000	2000	2000	40.3	ดี
142	46.8	0	26	1	1600	1600	1400	30.6	ยอมรับได้
143	42.1	0	9	0	2000	2000	2000	46.5	ดี
144	40.8	0	29	1	1800	1800	1600	60.3	ยอมรับได้
145	29.9	1	31	1	1600	1600	1400	43.9	ยอมรับได้
146	38.1	1	26	3	1800	1800	1600	73.2	ยอมรับได้
147	22.4	2	37	1	1600	1600	1400	64.9	ยอมรับได้
148	22.5	2	27	1	1700	1700	1500	56.8	ยอมรับได้
149	25.9	1	31	1	1600	1100	1400	47.5	ยอมรับได้
150	34	1	36	1	1600	1600	1400	41.7	ยอมรับได้

ตาราง ข้อมูลออกจากการตัดสินใจด้วยฟuzzyลอจิก และปรับฐานข้อมูล (Normalization)

No.	Oil	Age	Visual	Winding insulation	Load	Condition
1	0.8453	0.8822	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.8450	0.8632	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3	0.9098	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4	0.8450	0.8632	0.8641	1.0000	0.9536	1.0000
5	0.8463	0.3739	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
6	0.8664	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
7	0.8450	0.4160	0.8641	0.6555	1.0000	0.7059
8	0.7298	0.4160	0.8641	0.7743	1.0000	0.7059
9	0.8471	0.7540	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10	0.3250	0.4160	0.8641	0.8450	1.0000	0.4706
11	0.6529	0.4160	0.8641	0.7150	1.0000	0.7059
12	0.3250	0.3250	0.8641	0.5850	1.0000	0.4706
13	0.8450	0.2036	0.8641	0.5127	1.0000	0.1765
14	0.8627	0.0984	0.8641	0.5850	1.0000	0.4706
15	0.8560	0.3250	0.8641	0.6555	1.0000	0.7059
16	0.6630	0.3250	0.8641	0.5850	1.0000	0.4706
17	0.6427	0.5850	0.8641	1.0000	1.0000	1.0000
18	0.0983	0.8450	1.0000	1.0000	1.0000	0.7059
19	0.0983	0.5850	1.0000	0.8450	0.9536	0.4706
20	0.3250	0.8632	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
21	1.0000	0.8471	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
22	0.3250	0.8450	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
23	0.3250	0.8450	1.0000	0.9922	1.0000	1.0000
24	0.0983	0.4940	0.8641	0.7566	1.0000	0.4706

ตาราง ข้อมูลออกจากการตัดสินใจด้วยฟuzzyลอจิก และปรับฐานข้อมูล (Normalization) (ต่อ)

No.	Oil	Age	Visual	Winding insulation	Load	Condition
25	0.0983	0.3250	0.8641	0.7150	1.0000	0.4706
26	0.7871	0.1573	0.8641	0.5850	1.0000	0.4706
27	0.0983	0.3250	0.8641	0.6555	0.9536	0.4706
28	0.3250	0.0984	0.8641	0.5127	0.9536	0.1765
29	0.6154	0.8632	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
30	0.3250	0.8450	1.0000	1.0000	0.9536	1.0000
31	0.3250	0.3250	0.8641	0.7150	1.0000	0.4706
32	0.3250	0.3250	0.8641	0.5850	0.9536	0.4706
33	0.3250	0.3250	0.8641	0.6555	1.0000	0.4706
34	0.8695	0.8632	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
35	0.8450	0.8450	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
36	0.8479	0.8450	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
37	0.8450	0.3250	0.8641	0.0984	1.0000	0.1765
38	0.8450	0.3739	0.8641	0.7150	1.0000	0.7059
39	0.8575	0.8822	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
40	1.0000	0.5850	1.0000	0.8632	0.9563	1.0000
41	0.8450	0.5359	0.8641	0.8632	1.0000	1.0000
42	0.8744	0.8822	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
43	1.0000	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
44	0.7621	0.5850	1.0000	1.0000	0.9536	1.0000
45	0.8450	0.3250	0.6793	0.5304	1.0000	0.1765
46	0.8450	0.4550	0.8641	0.5850	1.0000	0.4706
47	0.8450	0.2733	0.6793	0.8450	1.0000	0.7059
48	0.8450	0.3250	0.6793	0.5850	1.0000	0.4706

ตาราง ข้อมูลออกจากการตัดสินใจด้วยฟuzzyลอจิก และปรับฐานข้อมูล (Normalization) (ต่อ)

No.	Oil	Age	Visual	Winding insulation	Load	Condition
49	0.8450	0.3250	0.8641	0.7743	1.0000	0.7059
50	1.0000	0.2733	0.6793	0.4550	1.0000	0.1765
51	0.8627	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
52	0.8450	0.0984	0.8641	0.5850	1.0000	0.1765
53	0.9098	0.5850	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
54	0.0983	0.0984	0.6793	0.3250	1.0000	0.1765
55	0.5850	0.3250	0.8641	0.4550	1.0000	0.1765
56	0.0983	0.3250	0.6793	0.3250	1.0000	0.1765
57	0.6212	0.0984	0.6793	0.8450	1.0000	0.4706
58	0.3250	0.2036	0.8641	0.8450	1.0000	0.4706
59	0.3250	0.2414	0.8641	0.3250	0.9536	0.1765
60	0.3250	0.1573	0.8641	0.8450	0.9542	0.4706
61	0.3250	0.3250	0.6793	0.5304	0.9536	0.1765
62	0.3250	0.0984	0.6793	0.4316	0.9536	0.1765
63	0.3250	0.5850	0.6793	0.5127	0.9536	0.1765
64	0.7522	0.3250	0.8641	0.5850	0.9536	0.1765
65	0.8648	0.4550	0.8641	0.0983	1.0000	0.1765
66	0.8534	0.2036	0.8641	0.7150	1.0000	0.7059
67	0.0983	0.0984	0.8641	0.5127	1.0000	0.1765
68	0.7103	0.2036	0.8641	0.5850	1.0000	0.1765
69	0.3250	0.4160	0.8641	0.7566	1.0000	0.4706
70	0.3250	0.3739	0.6793	0.8450	1.0000	0.4706
71	0.3250	0.4160	0.8641	0.7743	0.9536	0.4706
72	0.3250	0.4940	0.8641	0.7743	1.0000	0.4706

ตาราง ข้อมูลออกจากการตัดสินใจด้วยฟuzzyลอจิก และปรับฐานข้อมูล (Normalization) (ต่อ)

No.	Oil	Age	Visual	Winding insulation	Load	Condition
73	0.8723	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
74	0.8588	0.4550	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
75	0.7382	0.5359	1.0000	0.8450	0.9536	0.7059
76	0.8450	0.4160	0.8641	0.4550	0.9536	0.1765
77	0.7335	0.3739	0.8641	0.7150	0.9536	0.7059
78	0.8450	0.5850	0.6793	0.1118	1.0000	0.1765
79	0.8450	0.1573	0.8641	0.4550	1.0000	0.1765
80	1.0000	0.0984	0.6793	0.1689	0.9536	0.1765
81	0.5850	0.1573	0.4076	0.8450	1.0000	0.4706
82	0.5850	0.0984	0.6793	0.0984	1.0000	0.1765
83	0.3250	0.1573	0.8641	0.7150	1.0000	0.4706
84	0.0983	0.0984	0.4076	0.1118	1.0000	0.1765
85	0.8648	0.0984	0.4076	0.1118	1.0000	0.1765
86	0.6916	0.3739	0.8641	0.5021	1.0000	0.4706
87	0.6726	0.3250	0.8641	0.7743	0.9536	0.7059
88	0.3250	0.2414	0.6793	0.5850	0.9536	0.1765
89	0.8469	0.4160	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
90	0.7522	0.2036	0.8641	0.6555	1.0000	0.4706
91	0.8450	0.5850	1.0000	0.8450	1.0000	1.0000
92	0.8450	0.3250	0.6793	0.8450	0.9536	0.7059
93	0.3250	0.3739	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
94	0.3250	0.3250	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
95	0.8450	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
96	1.0000	0.8450	1.0000	0.8450	1.0000	1.0000

ตาราง ข้อมูลออกจากการตัดสินใจด้วยฟuzzyลอจิก และปรับฐานข้อมูล (Normalization) (ต่อ)

No.	Oil	Age	Visual	Winding insulation	Load	Condition
97	1.0000	0.3250	0.8641	0.7743	0.9610	0.7059
98	1.0000	0.4940	0.8641	0.8450	0.9536	0.7059
99	0.8671	0.8632	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
100	1.0000	0.8450	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
101	0.7522	0.8471	0.8641	0.3250	1.0000	0.1765
102	0.8450	0.3250	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
103	1.0000	0.2733	0.6793	0.8450	1.0000	0.7059
104	0.8518	0.2036	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
105	0.8640	0.3250	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
106	0.8492	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
107	0.8526	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
108	0.3250	0.3250	0.6793	0.8450	1.0000	0.4706
109	0.5913	0.0984	0.8641	0.8450	1.0000	0.4706
110	0.7010	0.4160	0.8641	0.8450	0.3668	0.7059
111	0.6479	0.2733	0.8641	0.8632	0.9536	0.7059
112	0.6266	0.3250	0.6793	0.8632	1.0000	0.7059
113	0.3250	0.4160	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
114	0.3250	0.5850	1.0000	1.0000	1.0000	0.7059
115	0.9207	0.8632	0.8641	1.0000	1.0000	1.0000
116	0.9337	0.1573	0.8641	0.6555	1.0000	0.4706
117	0.8385	0.3250	0.8641	0.5850	0.9536	0.4706
118	0.7010	0.3739	0.8641	0.7743	0.9536	0.7059
119	0.3250	0.3250	0.8641	0.7150	1.0000	0.4706
120	0.6097	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059



ตาราง ข้อมูลออกจากการตัดสินใจด้วยฟuzzyลอจิก และปรับฐานข้อมูล (Normalization) (ต่อ)

No.	Oil	Age	Visual	Winding insulation	Load	Condition
121	0.3250	0.3739	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
122	0.8859	0.8450	1.0000	0.8632	1.0000	1.0000
123	0.8450	0.4160	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
124	0.8450	0.3250	0.8641	0.7150	0.9536	0.7059
125	1.0000	0.8450	1.0000	0.8450	1.0000	1.0000
126	0.6916	0.1573	0.8641	0.5850	1.0000	0.4706
127	0.3250	0.7150	1.0000	0.8450	0.9536	0.4706
128	0.3250	0.7150	1.0000	0.8450	0.9821	0.7059
129	0.8534	0.8632	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
130	0.8469	0.3250	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
131	0.8450	0.4160	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
132	0.8450	0.3250	0.8641	0.8632	1.0000	0.7059
133	0.8450	0.4160	0.8641	1.0000	0.9536	1.0000
134	0.8450	0.3250	0.8641	0.7743	1.0000	0.7059
135	1.0000	0.8450	1.0000	0.8632	1.0000	1.0000
136	0.9132	0.5359	1.0000	0.8450	1.0000	0.7059
137	0.9038	0.2414	0.6793	0.8450	0.7339	0.7059
138	0.8531	0.4940	0.6793	0.8450	1.0000	0.7059
139	0.8144	0.2036	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
140	0.8575	0.4940	0.6793	0.8632	1.0000	0.7059
141	0.8495	0.8471	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
142	1.0000	0.4160	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
143	0.8796	0.8450	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
144	0.8664	0.3250	0.8641	0.8632	0.9536	0.7059

ตาราง ข้อมูลออกจากการตัดสินใจด้วยฟuzzyลอจิก และปรับฐานข้อมูล (Normalization) (ต่อ)

No.	Oil	Age	Visual	Winding insulation	Load	Condition
145	0.8385	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
146	0.8510	0.4160	0.4076	0.8632	0.9536	0.7059
147	0.3250	0.2036	0.8641	0.8450	0.9536	0.7059
148	0.3250	0.3739	0.8641	0.8495	0.9539	0.7059
149	0.6373	0.3250	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059
150	0.8450	0.2414	0.8641	0.8450	1.0000	0.7059

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
1	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Very_Good)
2	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Very_Good)
3	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Very_Good)
4	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Very_Good)
5	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Very_Good)
6	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Very_Good)
7	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Very_Good)
8	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Good)
9	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Good)
10	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Good)
11	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Good)
12	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Good)
13	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Good)

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
14	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Fair)
15	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Fair)
16	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Good)
17	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
18	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
19	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Fair)
20	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Fair)
21	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
22	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
23	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
24	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
25	If (H-G_Insulation is Very_Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
26	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Very_Good)

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
27	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Very_Good)
28	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Good)
29	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Good)
30	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Good)
31	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Good)
32	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Good)
33	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Good)
34	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Fair)
35	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Fair)
36	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Good)
37	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
38	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
39	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Fair)

ตาราง กฎฟัซซีของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟัซซีแบบ Mamdani
40	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Fair)
41	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
42	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
43	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
44	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
45	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
46	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
47	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Poor)
48	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Poor)
49	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
50	If (H-G_Insulation is Good) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
51	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Good)
52	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Good)

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
53	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Good)
54	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Fair)
55	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Fair)
56	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Good)
57	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
58	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
59	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Fair)
60	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Fair)
61	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
62	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
63	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
64	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
65	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ  
ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด  
หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
66	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
67	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Poor)
68	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Poor)
69	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
70	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
71	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Poor)
72	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Poor)
73	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Poor)
74	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Very_Poor)
75	If (H-G_Insulation is Fair) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)
76	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Good)
77	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
78	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)



ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
79	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Fair)
80	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Fair)
81	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
82	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
83	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
84	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
85	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
86	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
87	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Poor)
88	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Poor)
89	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
90	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
91	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Poor)

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
92	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Poor)
93	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Poor)
94	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Very_Poor)
95	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)
96	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Poor)
97	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Very_Poor)
98	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Very_Poor)
99	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Very_Poor)
100	If (H-G_Insulation is Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)
101	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
102	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Fair)
103	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Fair)
104	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ  
ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด  
หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
105	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
106	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Fair)
107	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Poor)
108	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Poor)
109	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Poor)
110	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Good) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Poor)
111	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Poor)
112	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Poor)
113	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Poor)
114	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Very_Poor)
115	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Fair) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)
116	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Poor)
117	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Very_Poor)

ตาราง กฎฟuzzyของค่าความเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ และค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

กฎที่	เงื่อนไขของกฎฟuzzyแบบ Mamdani
118	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Very_Poor)
119	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Very_Poor)
120	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)
121	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Good) then (P-HI is Very_Poor)
122	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Good) then (P-HI is Very_Poor)
123	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Fair) then (P-HI is Very_Poor)
124	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Poor) then (P-HI is Very_Poor)
125	If (H-G_Insulation is Very_Poor) and (H-L_Insulation is Very_Poor) and (L-G_Insulation is Very_Poor) then (P-HI is Very_Poor)

คำสั่งโปรแกรมภาษา Python – Jupyter Notebook สำหรับการหาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks : ANN)

```
>> import numpy as np
>> import pandas as pd
>> df = pd.read_excel("Data_ANN_Thesis1.xlsx")
>> df.head()
>> df.columns
>> cols = ['Oil', 'Age', 'Vis', 'Ins', 'Load']
>> row = ['Cluster']
>> X = df[cols]
>> Y = df[row]
>> input_value = np.array(X)
>> input_value.shape
>> output = np.array(Y)
>> output.shape
>> weights = np.array([[6],[5],[9],[6],[10]])
>> bias = 0
>> def sigmoid_func(x):
    return 1/(1 + np.exp(-x))
>> def der(x):
    return sigmoid_func(x) * (1 - sigmoid_func(x))
>> pred = np.array([3.324 , 1.75 , 3.18 , 0.378 , 3.408 ])
>> result = np.dot(pred, weights) + bias
>> res = sigmoid_func(result)
>> print(res)
>> print(result)
>> for epochs in range(1000000):
    input_arr = input_value
    weighted_sum = np.dot(input_arr, weights) + bias
```

คำสั่งโปรแกรมภาษา Python – Jupyter Notebook สำหรับการหาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks : ANN) (ต่อ)

```
first_output = sigmoid_func(weighted_sum)
error = first_output - output
total_error = np.square(np.subtract(first_output,output)).mean()
#print(total_error)
first_der = error
second_der = der(first_output)
derivative = first_der * second_der
t_input = input_value.T
final_derivative = np.dot(t_input, derivative)
#update weights
weights = weights - 0.1 * final_derivative
#update bias
for i in derivative:
    bias = bias - 0.1*i
>> w = weights/(sum(weights))
>> print(weights)
>> print(bias)
>> print(w)
```

ภาคผนวก ข  
ผลงานทางวิชาการ

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



### การจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

กรณีศึกษา : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 (ภาคใต้)

#### Condition Classification of Distribution Transformer Using Artificial Neural Network

Case Study : Provincial Electricity Authority Area 3 (Southern)

กิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ<sup>1</sup> และ เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถ.กาญจนาภิเษย์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา E-mail : 6310120087@email.psu.ac.th

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถ.กาญจนาภิเษย์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา E-mail: kiattisak.w@psu.ac.th

## บทคัดย่อ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อผู้ใช้บริการพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการมีกรจำแนกสภาพ เพื่อลดการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะติดตั้งใช้งาน และนำไปสู่การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีจำแนกสภาพด้วยโครงข่ายประสาทเทียมจากผลการบำรุงรักษาประจำปีจำนวน 100 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญ 5 ปัจจัย แบ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสภาพหม้อแปลงเชิงบวก 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – กราวด์ ค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ ค่าทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง และปัจจัยที่มีผลต่อสภาพหม้อแปลงเชิงลบ 2 ปัจจัย ได้แก่ อายุการติดตั้ง และการรับโหลด การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการทดลองกับชุดข้อมูลทดสอบ (Test) จำนวน 25 ตัวอย่าง มีความถูกต้อง 22 ตัวอย่าง คิดเป็น 88%

คำสำคัญ: หม้อแปลงไฟฟ้า, การจำแนกสภาพ, โครงข่ายประสาทเทียม

## Abstract

Distribution transformers are one of the importance equipment to provide electricity to consumers. It should be monitored to reduce the breakdown of the transformers and to perform preventive maintenance. This study used artificial neural network method to monitor transformers by classifying transformer's condition from 100 samples of annual maintenance results. The result shows that three positive factors affecting transformer condition are high voltage – ground insulation, high voltage – low voltage insulation and oil breakdown voltage and two negative factors affecting transformer condition are age of installation, load. Artificial neural network test produced an accuracy of 88%.

Keywords: transformer, condition classification, artificial neural network

## 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างหน่วยงานผู้ให้บริการกับผู้ให้บริการพลังงานไฟฟ้า ซึ่งหากหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหายย่อมส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้บริการ คุณภาพการให้บริการของผู้ให้บริการ และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในระบบจำหน่าย

การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมุ่งเน้นการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เพื่อลดการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะติดตั้งใช้งาน สามารถวางแผน ระยะเวลาการทำงาน ได้มากกว่าการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข หากแต่การบำรุงรักษาเชิงป้องกันต้องอาศัยเครื่องมือหรือวิธีการระบุจำแนก ประเมินหรือคาดการณ์ สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการตรวจสอบปัจจัยต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอก โดยเทียบเคียงกับข้อมูลมาตรฐานหรือการตัดสินใจจากผู้เชี่ยวชาญ

จากข้อมูล ดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้จึงศึกษาวิธีการที่สามารถจำแนกสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า จากข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าประจำปี โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยฟังก์ชันกระตุ้นแบบจำกัดเชิง (Hardlim) เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถนำสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้รับการจำแนก ไปทำการวางแผนบำรุงรักษาซ่อมแซม หรือสืบเปลี่ยนต่อไป

## 2. ทบทวนวรรณกรรม

[1] ได้นำเสนอดัชนีวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของการไฟฟ้าในกรหลวง โดยวิธีการ



**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



ตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบครวระคลุมเครือ เป็นวิธีการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่มีความเสี่ยงที่มาจาก การตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Analytic Hierarchy Process : FAHP)

[3] ได้มีเสนอการตรวจจัดการสัควจรภายในขดลวดของหม้อแปลงแบบออนไลน์ โดยใช้วิธี Harmonic PMU (phasor measurement unit) และ fuzzy logic (FL) ผ่านความแตกต่างของกระแส (differential current spectrum) ในปัจจุบันของ Phasor ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

[5] ได้มีเสนอระบบทำนายสุขภาพ (Prognostics Health Management : PHM) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยใช้ Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM) เพื่อตรวจสอบความทนทานและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

[6] ได้มีเสนอดัชนีสุขภาพที่พัฒนาสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการรวมผลการทดสอบต่างๆ เพื่อประเมินสภาพของหม้อแปลงจากเครื่องมือทางสถิติ SPSS วิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบของหม้อแปลงและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและพารามิเตอร์ต่างๆ

**3. ทฤษฎีและวิธีดำเนินการ**

**3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

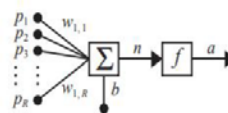
ค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's correlation) เป็นการศึกษาค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear relationship) ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรหรือข้อมูล 2 ชุด ว่ามีความสัมพันธ์ในระดับใด และมีทิศทางความสัมพันธ์เป็นแบบใด ตามสมการ (1) [2]

$$r_{xy} = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n(\sum x^2) - (\sum x)^2][n(\sum y^2) - (\sum y)^2]}} \quad (1)$$

- $r_{xy}$  = ค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน
- $X$  = ข้อมูลตัวแปรที่ 1 หรือตัวแปร X
- $Y$  = ข้อมูลตัวแปรที่ 2 หรือตัวแปร Y
- $n$  = จำนวนข้อมูล

การเลือกข้อมูลหรือปัจจัย (Feature Selection) ด้วยวิธี Recursive Feature Elimination (RFE) เป็นวิธีการสร้างโมเดล โดยการเลือกข้อมูลและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดล โมเดลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ตัวแปรที่อยู่ในโมเดลนั้นจะถูกเลือก และมีการทำงานจนจบจนเสร็จ

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ ในการประมวลผลข้อมูลที่คำนวณแบบคอนเนกชันนิสต์ (Connectionist) ในลักษณะการจำลองการทำงานสมองมนุษย์ มีการอบรมเพื่อให้ผลลัพธ์ตรงกับเป้าหมาย สามารถแบ่งได้ 3 แบบ [4] คือ การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (Reinforcement Learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning)



รูปที่ 1 โครงข่ายประสาทเทียม

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,r}p_r + b \quad (2)$$

$$a = f(n) \quad (3)$$

- $w$  = ค่าน้ำหนักของข้อมูล
- $p$  = ข้อมูลเข้า (input)
- $b$  = ค่าอคติ (bias)
- $f$  = ฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอน
- $a$  = ข้อมูลออก (output)

**3.2 วิธีดำเนินการ**

การจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถจำแนกได้จากข้อมูล 7 ปัจจัย ตามตารางที่ 1 ที่ได้จากการเก็บข้อมูลบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 (ภาคใต้) จำนวน 100 ตัวอย่าง แบ่งเป็นการทดลอง (Train) จำนวน 75 ตัวอย่าง และทดสอบ (Test) จำนวน 25 ตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้สำหรับจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัยทดสอบ / ตรวจสอบ	หน่วย
ค่าทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง (Breakdown Voltage : F1)	kV/2.5 mm
อายุการติดตั้ง (Age : F2)	ปี
การตรวจสอบสภาพภายนอก (Visual Inspection : F3)	จำนวนปัญหา
ค่าทดสอบการเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูง – กราวด์ (H-G Insulation : F4)	เมกะโอม์

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14  
 14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



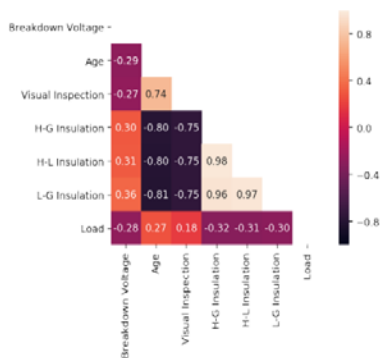
ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้สำหรับจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า (ต่อ)

ปัจจัยทดสอบ / ตรวจสอบ	หน่วย
ค่าทดสอบการเป็นฉนวนของขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ (H-L Insulation : F5)	เมกะโอม
ค่าทดสอบการเป็นฉนวนของขดลวดแรงต่ำ – กราวด์ (L-G Insulation : F6)	เมกะโอม
ภาระการรับโหลด (Load : F7)	เปอร์เซ็นต์

**4. ผลการทดลองและอภิปรายผล**

**4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลและเลือกปัจจัยที่ใช้จำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า**

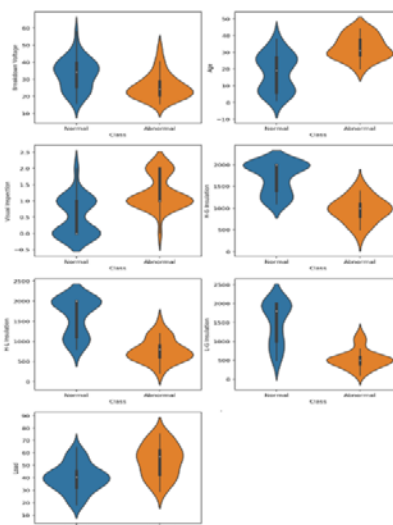
จากรูปที่ 2 ค่าความสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's correlation) ของทั้ง 7 ปัจจัย พบว่าปัจจัยเชิงบวกค่าทดสอบค่าฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ – กราวด์ มีความสัมพันธ์สูงสุด รองลงมาเป็นค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ปัจจัยเชิงลบค่าทดสอบค่าฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ – กราวด์ กับอายุการติดตั้งมีความสัมพันธ์มากที่สุด รองลงมาเป็นการตรวจสอบสภาพภายนอก กล่าวคือ ค่าฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ – กราวด์ ค่าความเป็นฉนวนของน้ำมัน หม้อแปลงไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้นย่อมส่งผลให้สภาพหม้อแปลงไฟฟ้าดีขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของอายุติดตั้ง การตรวจสอบสภาพภายนอก ภาระการรับ โหลด ย่อมส่งผลให้สภาพหม้อแปลงไฟฟ้าแย่ลง



รูปที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ของทั้ง 7 ปัจจัย

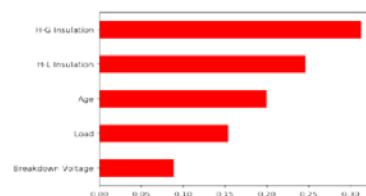
จากรูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า กลุ่มหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพปกติจะมีค่าเฉลี่ยของค่าทดสอบ

ความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ค่าฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ – กราวด์ สูงกว่ากลุ่มหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดปกติ ในทางกลับกัน กลุ่มหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพปกติจะมีค่าเฉลี่ยของอายุการติดตั้ง การตรวจสอบสภาพภายนอก ภาระการรับ โหลด ต่ำกว่ากลุ่มหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดปกติ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

จากปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบสามารถนำไปหาค่าความสำคัญของแต่ละปัจจัยด้วยวิธี RFE พบว่า การลดปัจจัยจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าเพียง 5 ปัจจัย ยังคงทำให้คะแนนความสำคัญเท่ากับ 7 ปัจจัย มีค่าอยู่ที่ 0.8629 ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดเป็นค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – กราวด์ ค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ อายุติดตั้ง ภาระ โหลด และค่าทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าความสำคัญของ 5 ปัจจัย ที่มีผลต่อการจำแนกสภาพ

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14

14<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2022 (EENET 2022)



**4.2 การจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธี  
โครงข่ายประสาทเทียม**

การจำแนกสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าพิจารณาเป็น 2 แบบ คือ สภาพปกติ และสภาพผิดปกติ ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมกำหนดโครงข่ายจำนวน 1 โครงข่าย มีข้อมูลเข้าจำนวน 5 ข้อมูล จากปัจจัยที่ใช้ในการจำแนก (ค่าทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง อุณหภูมิตั้ง ค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – กราวด์ ค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ และภาวะ โหลด) ที่ได้ที่เป็นมาตรฐานข้อมูล (Normalize) จาก 0 - 1 กำหนดอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.5 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ (Weight) 0.1 ค่าอคติ (bias) เท่ากับ 1 จำนวนรอบสูงสุดในการปรับค่าน้ำหนักและค่าอคติเท่ากับ 100,000 รอบ โดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบจำกัดเชิง (Hardlim) พบว่าสามารถจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดังสมการ (4)

$$n = -0.9 + 3.0888(F1) - 5.0818(F2) + 6.1775(F4) + 2.6250(F5) - 4.5843(F7) \quad (4)$$

ตารางที่ 2 น้ำหนักของ 5 ปัจจัย ที่ใช้ในการจำแนกสภาพ

ปัจจัย	น้ำหนัก ( W )
ค่าทดสอบความเป็นฉนวนของน้ำมัน	3.0888
อุณหภูมิติดตั้ง	-5.0818
ค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – กราวด์	6.1775
ค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง – แรงต่ำ	2.6250
ภาวะการรับโหลด	-4.5843

จากสมการ (4) การจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของฟังก์ชันกระตุ้นแบบจำกัดเชิง (Hardlim) เมื่อ  $n \geq 0$  หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพปกติ และเมื่อ  $n < 0$  หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพผิดปกติ และผลการทดสอบกับข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง (Train) 75 ตัวอย่าง มีความถูกต้อง 67 ตัวอย่าง คิดเป็น 89% และนำไปทดสอบกับข้อมูลทดสอบ (Test) จำนวน 25 ตัวอย่าง มีความถูกต้อง 22 ตัวอย่าง คิดเป็น 88%

**5. สรุปและข้อเสนอแนะ**

จากการศึกษาการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายทั้ง 7 มีปัจจัยค่าทดสอบการเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูง –

กราวด์ มีผลต่อสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าในทางบวกมากที่สุด ( W = 6.1775) และอุณหภูมิติดตั้งน้ำหนักอุณหภูมิติดตั้งมีผลต่อสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าในทางลบมากที่สุด ( W = - 5.0818) เนื่องจากกรณีติดตั้งใช้งานนานขึ้น ย่อมส่งผลต่อการเพิ่มการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบหม้อแปลงไฟฟ้า จึงหาผลการจำแนกสภาพ มีผลเป็นสภาพผิดปกติควรรีบวางแผนบำรุงรักษา ซ่อมแซม ก่อนที่จะเกิดการชำรุดเสียหาย และสร้างผลกระทบต่อหน่วยงานและผู้ใช้งานระบบไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไป เป็นควรมีการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าให้ละเอียดของสภาพมากกว่า 2 ระดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนการบำรุงรักษา การจัดลำดับความสำคัญในการเข้าแก้ไขซ่อมแซม สืบเปลี่ยนต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] กนกภูมิ จิตวิระ และปานจิต ตีระกุลถาวร. (2560). ดัชนีวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสำหรับบำรุงรักษาเชิงป้องกันของกรไฟฟ้าในกรหลวงโดยวิธีการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมแบบตรรกะคลุมเครือ. วารสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 30(100), 33-42.
- [2] ชนินันท์ พงษ์ประมุข และคณช. (2563). ประสิทธิภาพของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน สเปียร์แมน และเคนคอลลี เมื่อข้อมูลแจกแจงแบบไม่ปกติ. วารสารอิเล็กทรอนิกส์ทางการศึกษา, 2(15).
- [3] David Granados-Lieberman et al. "Harmonic PMU and Fuzzy Logic for Online Detection of Short-Circuited Turns in Transformers", Electric Power System Research, vol 190, pp 11-11, 2021.
- [4] Hagan, M. T.; Demuth, H. B. and Beale, M. 1996. Neural Network Design. Boston MA: PWS Publishing.
- [5] Muhammad Abdillah et al., "Prognostics Health Management (PHM) System for Power Transformer Using Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM)", The International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry, Tangerang, Indonesia, September 28–29, 2020.
- [6] Wang Jian et al., "The New Developed Health Index for Power Transformer Condition Assessment", Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chengdu, China, June 4-7, 2020.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45  
The 45<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-45)  
วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565 ณ ศูนย์ราชการมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก



## การศึกษาความสัมพันธ์ของภาระโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล และอุณหภูมิภายในหม้อแปลง ระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

A Study of Relationship of Load, Unbalance Load, and Temperature in 33 kV

Distribution Transformer of Provincial Electricity Authority

กิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ<sup>1</sup> และ เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนกุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 6310120087@email.psu.ac.th

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ kiattisak.w@psu.ac.th

### บทคัดย่อ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายมีความสำคัญในการทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างผู้ให้บริการไฟฟ้ากับผู้รับบริการไฟฟ้า การชำรุดของหม้อแปลงส่งผลกระทบต่อผู้ให้บริการไฟฟ้า และอุปกรณ์ส่วนอื่นในระบบจำหน่าย โดยการชำรุดส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของฉนวนภายในหม้อแปลง ซึ่งมาจากความร้อนภายในหม้อแปลงจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า งานวิจัยฉบับนี้จึงศึกษาความสัมพันธ์ของภาระโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล และอุณหภูมิภายในหม้อแปลงระบบจำหน่าย 33 kV โดยการติดตั้งมิเตอร์สำหรับวัด โหลด และการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera) สำหรับวัดค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงจำนวน 4 เครื่อง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ ทดสอบความสัมพันธ์ และสามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของภาระโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล ที่จะมีผลต่ออุณหภูมิภายในหม้อแปลง ผลการศึกษาพบว่า ภาระโหลดมีความสัมพันธ์เชิงบวกและมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิหม้อแปลงมากกว่าภาวะโหลดไม่สมดุล จากสมการความสัมพันธ์อุณหภูมิหม้อแปลงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงที่มีภาระโหลดมากกว่า 70% และภาวะโหลดไม่สมดุลจะส่งผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อมีค่ามากกว่า 40% สำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของสมการความสัมพันธ์ จากข้อมูลหม้อแปลงทดสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.25% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.74%

**คำสำคัญ:** หม้อแปลงระบบจำหน่าย สมการความสัมพันธ์ อุณหภูมิหม้อแปลง

### Abstract

Distribution transformers are important for the connection between electricity service providers and electricity consumers. The breakdown of the transformer will inevitably affect the service users and other equipment in the distribution system. Most of the breakdowns occur from the deterioration of the insulation inside the transformer which comes from the heat inside the transformer of the power

distribution. This research studies the relationship between load, unbalanced load, and temperature in the 33 kV distribution transformer. The methods are meter installation to measure the load and the use of thermal imaging cameras to measure the temperature value of 4 transformers. The obtained data can be used to find the relationship test and can predict the increase or decrease of load and unbalanced load that will affect the temperature of the transformer. The results showed that the load has a positive relationship and more influence on the transformer temperature than the unbalanced load. The relationship equation shows that the transformer temperature tends to increase rapidly during the load range greater than 70% and the unbalanced load will affect the transformer temperature rise when it is greater than 40%. The error test of relationship equations based on the test transformer data showed that the mean error was 3.25% and the error standard deviation was 1.74%.

**Keywords:** Distribution Transformer, Relationship Equation, Transformer Temperature

### 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างผู้ให้บริการไฟฟ้ากับผู้รับบริการไฟฟ้า การชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายส่งผลกระทบต่อผู้ให้บริการไฟฟ้าโดยตรง รวมไปถึงการสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ส่วนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของฉนวนภายในหม้อแปลง ซึ่งความร้อนภายในหม้อแปลงที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่เร่งการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลง และลดประสิทธิภาพความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า [1] จึงมีการนำเสนอแนวคิดสำหรับกรหาความร้อนของหม้อแปลงในวิธีต่าง ๆ ได้แก่ [2] นำเสนอโมเดลวงจรสำหรับหาความร้อนของหม้อแปลงแบบ 3 เฟส ที่นำการจ่ายโหลดไม่สมดุลมาพิจารณา

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45  
 The 45<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-45)  
 วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565 ณ อุทยานรังสรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก



โดยการประยุกต์วงจรแบบ 1 เฟส 3 วงจร พบว่าการจ่ายโหลดไม่สมดุล ในช่วง 0 - 30% ส่งผลต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ การจ่ายโหลดไม่สมดุลถึง 60% และอุณหภูมิที่คำนวณได้ของโมเดลที่ เสนอเป็นค่ากลางที่มีความเป็นไปได้มากกว่าวิธี IEEE model และ max-phase model เมื่อมีการจ่ายโหลดไม่สมดุลเกิดขึ้น และ [1] นำเสนอ ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางด้านโหลดที่มีลักษณะไม่สมดุลกับอุณหภูมิ จุดร้อนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบ 3 เฟส และ สมการคำนวณจุดร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่มีการ ปรับปรุงให้สูงขึ้นกับการใช้งานของหม้อแปลงแบบตลอดเวลา

จากข้อมูลการเสนอแนวทางหาความร้อนของหม้อแปลง ดังกล่าว เป็นการคำนวณบนพื้นฐานจากค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบใน ห้องปฏิบัติการ ซึ่งหม้อแปลงระบบจำหน่ายเป็นหม้อแปลงที่มีการ เปลี่ยนแปลงของภาระโหลด และภาวะโหลดไม่สมดุลตลอดเวลา ประกอบกับการติดตั้งภายนอกอาคารจะได้รับผลกระทบจาก สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อกระบวนการระบายความร้อนแตกต่างกัน งานวิจัยฉบับนี้ จึงศึกษาความสัมพันธ์ของภาระ โหลด ภาวะ โหลดไม่สมดุล และอุณหภูมิ ภายในหม้อแปลงระบบจำหน่าย จากการเก็บข้อมูลจริงในระบบจำหน่าย 33 kV ด้วยการติดตั้งมิเตอร์แบบประกอบหม้อแปลงกระแสสำหรับวัด โหลด และการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera) สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ ทดสอบ และสามารถ คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของภาระ โหลด ภาวะ โหลด ไม่สมดุล ที่จะส่งผลต่ออุณหภูมิภายในหม้อแปลงระบบจำหน่าย 33 kV ต่อไป

2. ทฤษฎีและวิธีดำเนินการ

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's correlation) เป็นการศึกษา ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear relationship) ในลักษณะของความสัมพันธ์ เชิงบวกหรือความสัมพันธ์เชิงลบทางสถิติระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร ซึ่งมี ค่าความสัมพันธ์อยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 ตามสมการ (1) [3]

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \left( \sum x_i \right) \left( \sum y_i \right)}{\sqrt{n \sum x_i^2 - \left( \sum x_i \right)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - \left( \sum y_i \right)^2}} \quad (1)$$

- r = ค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน
- x = ข้อมูลตัวแปรที่ 1 หรือตัวแปร x
- y = ข้อมูลตัวแปรที่ 2 หรือตัวแปร y
- n = จำนวนข้อมูล

การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลิโนเมียล (Polynomial Regression Analysis) เป็นกระบวนการทางสถิติสำหรับประมาณความสัมพันธ์ของ ตัวแปร หรือใช้วิเคราะห์สำหรับการพยากรณ์ในช่วงข้อมูลต่าง ๆ [4]

จึงสามารถกำหนดจำนวนลำดับ (Order) ให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ ตามสมการ (2) เป็นการสร้างความสัมพันธ์จำนวน 2 ลำดับ 1 ตัวแปร

$$y_k = \beta_2 x_k^2 + \beta_1 x_k + \beta_0 + \varepsilon_k \quad (2)$$

- y = ค่าตัวแปรตาม
- β = ค่าสัมประสิทธิ์
- x = ค่าตัวแปรอิสระ
- ε = ค่าความคลาดเคลื่อน
- k = จำนวนชุดข้อมูล (1,2,3,...,m)

2.2 วิธีดำเนินการ

การศึกษาค่าความสัมพันธ์ของภาระ โหลด ภาวะ โหลด ไม่สมดุล และ อุณหภูมิภายในหม้อแปลงระบบจำหน่าย เป็นการศึกษาเก็บข้อมูลจาก หม้อแปลงระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จำนวน 4 เครื่อง แบ่งเป็นสำหรับหาความสัมพันธ์จำนวน 3 เครื่อง และทดสอบ ความสัมพันธ์จำนวน 1 เครื่อง รายละเอียดคุณสมบัติตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดหม้อแปลงระบบจำหน่ายสำหรับเก็บข้อมูล

รายละเอียดคุณสมบัติ	ค่าขนาด
ประเภทของการฉนวน	น้ำมัน (Oil-Immersed Transformer)
ขนาด	100/160/250 kVA
ระบบเฟส	3 เฟส
พิกัดแรงดัน – แรงสูง	33 kV
พิกัดแรงดัน – แรงต่ำ	230/400 V
ระบบระบายความร้อน	ONAN
ระบบการต่อขดลวด	Dyn11
อุณหภูมิสูงสุดของน้ำมัน/ขดลวด	60/65 °C

โดยมีการวัดค่าภาระ โหลด ภาวะ โหลด ไม่สมดุล ด้วยการติดตั้ง มิเตอร์ 3 เฟส 4 สาย ขนาด 5(6) แอมป์ แบบประกอบหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) ขนาด 400/5 แอมป์ ซึ่งจะทำการเก็บค่ากระแส แรงแค้น และกำลังไฟฟ้า ในทุก ๆ 15 นาที



(a) การติดตั้งมิเตอร์สำหรับวัดกระแส (b) การดึงข้อมูลจากมิเตอร์ รูปที่ 1 การวัดค่ากระแส โหลด ภาวะกระแสไม่สมดุล ด้วยการติดตั้งมิเตอร์

การเก็บอุณหภูมิของหม้อแปลงใช้การถ่ายภาพความร้อนด้วยกล้อง ถ่ายภาพความร้อน SATIR HoEind-S ในทุก ๆ 15 นาที ตามการเก็บ ข้อมูลของมิเตอร์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45  
 The 45<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-45)  
 วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565 ณ ศูนย์การประชุมอิมพีเรียล จัตุรัสเมือง จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 2 การวัดค่าอุณหภูมิของหม้อแปลง

ในการเก็บข้อมูลจะดำเนินการเก็บในช่วงเวลา 06.00 – 08.00 น. และ 17.00 – 21.00 น. เป็นเวลาเครื่องละ 4 วัน เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลด และการใช้โหลดสูงสุดสำหรับหม้อแปลงระบบจำหน่าย รวมไปถึงการลดผลกระทบของแสงแดดที่กระทบต่อหม้อแปลง โดยมีปัจจัยที่พิจารณาความสัมพันธ์ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดหม้อแปลงระบบจำหน่ายสำหรับเก็บข้อมูล

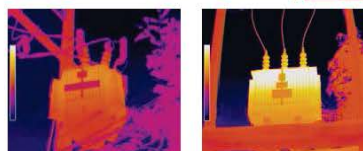
ปัจจัย	รายละเอียด	หน่วย
ภาวะโหลด (Load : L)	การจ่ายกำลังไฟฟ้าเทียบกับพิกัดของหม้อแปลง	%
ภาวะโหลดไม่สมดุล (Unbalance Load : Un)	ความแตกต่างของการจ่ายกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของหม้อแปลง	%
อุณหภูมิของหม้อแปลง (Transformer temperature : Temp)	การวัดค่าจำนวนค่า อุณหภูมิบริเวณส่วนบนของหม้อแปลง	°C
อุณหภูมิของบรรยากาศ (Atmospheric temperature : Amp)	อุณหภูมิบริเวณรอบ ๆ หม้อแปลง	°C
ส่วนต่างของอุณหภูมิหม้อแปลงกับบรรยากาศ (Difference temperature : Diff)	ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณบนของหม้อแปลงกับบรรยากาศ (Temp - Amp)	°C

สำหรับการวิจัยครั้งนี้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของภาวะโหลด และภาวะโหลดไม่สมดุล กับอุณหภูมิของหม้อแปลง ด้วยการสร้างสมการความสัมพันธ์ของภาวะโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล กับอุณหภูมิส่วนต่างระหว่างหม้อแปลงและบรรยากาศ แล้วนำสมการความสัมพันธ์ร่วมกับอุณหภูมิบรรยากาศ ตามสมการที่ 3

$$Temp = \beta_0 L^2 + \beta_1 Un^2 + \beta_2 L^2 + \beta_3 Un^2 + \beta_4 LUn + \beta_5 LU^2 + \beta_6 LUn + \beta_7 L + \beta_8 Un + \beta_9 + Amp \quad (3)$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

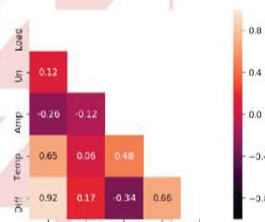
การศึกษาความสัมพันธ์จากการเก็บข้อมูลหม้อแปลงสำหรับหาความสัมพันธ์จำนวน 3 เครื่อง พบว่าอุณหภูมิของหม้อแปลงบริเวณส่วนบนหรือฝ้าถังหม้อแปลง จะสูงกว่าบริเวณส่วนล่างหรือก้นหม้อแปลงตามรูปที่ 3 การวิจัยครั้งนี้จึงวัดอุณหภูมิแต่ละเครื่องจากบริเวณส่วนบนหรือฝ้าถังหม้อแปลง ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้



(a) หม้อแปลงขนาด 160 kVA (b) หม้อแปลงขนาด 250 kVA  
 รูปที่ 3 ภาพถ่ายความร้อนของหม้อแปลง

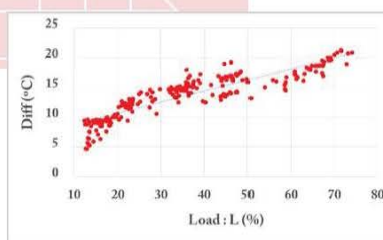
3.1 ความสัมพันธ์ของภาวะโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล และอุณหภูมิของหม้อแปลง

ความสัมพันธ์ของภาวะโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล เป็นค่าสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิของหม้อแปลง โดยภาวะโหลด (0.92) จะมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของหม้อแปลงสูงกว่าภาวะโหลดไม่สมดุล (0.17) ซึ่งสอดคล้องกับ [1] การเพิ่มของโหลดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนมากกว่าโหลดไม่สมดุล ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

ตามรูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ของภาวะโหลด ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงกับอุณหภูมิส่วนต่างของอุณหภูมิหม้อแปลงกับบรรยากาศ มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียล (Polynomial regression analysis) จึงมีความเหมาะสมมากกว่าการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression analysis)



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาวะโหลดกับส่วนต่างของอุณหภูมิหม้อแปลงกับบรรยากาศ

3.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบโพลีโนเมียล (Polynomial regression analysis)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของภาวะโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล กับอุณหภูมิส่วนต่างระหว่างหม้อแปลงและบรรยากาศ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) เท่ากับ 0.849 ที่สมการอันดับ 2,



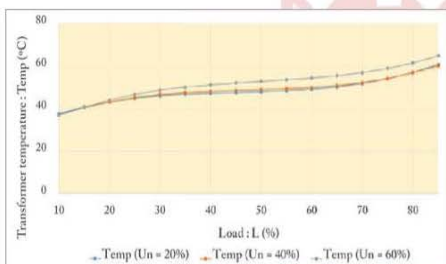
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 45  
 The 45<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EBCON-45)  
 วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2565 ณ ศูนย์การประชุมอิมพีเรียล จัตุจักร กรุงเทพมหานคร

0.895 ที่สมการอันดับ 3, 0.896 ที่สมการอันดับ 4 ซึ่งมีค่ามากกว่าการถดถอยแบบเชิงเส้น (R Square = 0.798)

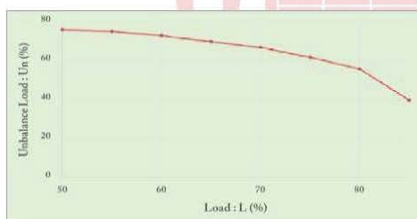
งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้การถดถอยแบบโพลีโนเมียลสมการอันดับ 3 เนื่องจากค่า R Square ที่ได้มีค่าเหมาะสมเพียงพอ และลดโอกาสการเกิด Overfitting โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรอิสระ (Coefficient :  $\beta$ ) ค่าจุดตัดแกนตั้ง (intercept :  $\beta_0$ ) ตามสมการความสัมพันธ์ (4)

$$\text{Temp} = 170.14(L^3) + 56.73(Un^3) - 221.56(L^2) - 74.59(Un^2) - 58.84(L^2)(Un) + 87.16(L)(Un^2) + 4.49(L)(Un) + 109.23(L) + 19.79(Un) - 5.45 + \text{Amp} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) ณ อุณหภูมิบรรยากาศ 32.4 °C (อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของภาคใต้ประเทศไทยปี 2564) สามารถนำไปหาความสัมพันธ์ของภาระโหลด กับอุณหภูมิหม้อแปลงที่ภาวะโหลดไม่สมดุลเท่ากับ 0.2, 0.4 และ 0.6 ได้ตามรูปที่ 6 และการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาระโหลดกับภาวะโหลดไม่สมดุล ที่ทำให้อุณหภูมิหม้อแปลงอยู่ที่ 60 °C ได้ตามรูปที่ 7



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของภาระโหลดที่ส่งผลต่ออุณหภูมิหม้อแปลง



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของภาระโหลดและภาวะโหลดไม่สมดุล ที่ส่งผลให้อุณหภูมิหม้อแปลงเท่ากับ 60 °C

จากการเก็บข้อมูลของหม้อแปลงที่ใช้สำหรับทดสอบจำนวน 1 เครื่อง สามารถนำมาทดสอบหาความสัมพันธ์ของสมการที่ (4) ซึ่งได้แสดงตัวอย่างจำนวน 4 ข้อมูล ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ของสมการที่ (4)

L	Un	Amp	Temp (กำหนด)	Temp (ค่าที่วัด)	คลาดเคลื่อน
58%	29%	27.6	44.2	43.1	2.55%
47%	30%	28.5	44.2	43.6	1.38%
28%	23%	23.8	37.1	35.1	5.70%
20%	18%	24.7	35.3	36.4	3.02%

#### 4. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาความสัมพันธ์ของภาระโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล และอุณหภูมิของหม้อแปลง พบว่าภาระโหลดมีความสัมพันธ์เชิงบวกและมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิหม้อแปลงมากกว่าภาวะโหลดไม่สมดุล ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (4) จากรูปที่ 6 พบว่าอุณหภูมิหม้อแปลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเร็วในช่วงที่ภาระโหลดมากกว่า 70% เนื่องจากข้อจำกัดของหม้อแปลงที่ไม่มีอุปกรณ์ช่วยระบายความร้อน และภาวะโหลดไม่สมดุลจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อมีค่ามากกว่า 40% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ [2] ที่มีค่าอยู่ที่ 30% จากรูปที่ 7 เป็นค่าภาวะโหลด ภาวะโหลดไม่สมดุล ที่ทำให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิ 60 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของน้ำมันหม้อแปลง ณ อุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 32.4 °C หากหม้อแปลงรับภาระโหลด หรือภาวะโหลดไม่สมดุลมากกว่าค่าที่ได้จะทำให้อุณหภูมิหม้อแปลงมากกว่า 60 °C ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของจำนวนหม้อแปลงได้มากกว่าปกติ สำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของสมการที่ (4) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.25% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.74%

ข้อเสนอแนะจากการศึกษา เพื่อให้สามารถประเมินอุณหภูมิหม้อแปลงได้กว้างขึ้น ควรเก็บค่าทุกระดับของภาระโหลด และภาวะโหลดไม่สมดุล รวมถึงศึกษาหม้อแปลงระบบ 22 หรือ 24 kV ร่วมด้วย

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รับทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างกรมไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Duan, D. Wan, M. Zhao, F. Qi, H. Zhou, W. Zhou, and Y. Peng, "A Calculation Method of Distribution Power Transmission Equipment Hot Spot Temperature Based on Relative Load Coefficient," in *Proc. Int. Energy Internet and Energy System Integration (EI2) Conf.*, 2019.
- [2] L. Kong, W. Mo, and S. Luo, "The Modified Thermal Circuit Model for Three-phase Unbalanced Operation of Distribution Transformers," in *Proc. Int. Energy Internet and Energy System Integration (EI2) Conf.*, 2020.
- [3] L. Egghe, and L. Leydesdorff, "The relation between Pearson's correlation coefficient r and Salton's cosine measure," *Int. J. American Society for Information Science and Technology*, vol. 60(5), pp. 1027–1036, 2009.
- [4] H. Niu, Q. Lu and C. Wang, "Color Correction Based on Histogram Matching and Polynomial Regression for Image Stitching," in *Proc. Int. on Image, Vision and Computing (ICIVC) Conf.*, 2018.



งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟผ. ปี 2565

Sustainable Electricity Utility in VUCA World

การสร้างพลังงานอย่างยั่งยืนบนโลกที่แปรเปลี่ยน

14 - 15 ธันวาคม 2565

## การจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้วิธี K-means Clustering และ Decision Tree Learning

นายกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ<sup>1</sup>, ดร.เกียรติศักดิ์ วงษ์โสพนากุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 6310120087@email.psu.ac.th

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ kiattisak.w@psu.ac.th

### บทคัดย่อ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่มีมูลค่าสูงและมีความสำคัญในระบบไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างหน่วยงานผู้ให้กับผู้ใช้งานไฟฟ้า หากเกิดการชำรุดเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า คุณภาพการให้บริการ รวมไปถึงอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าจึงมุ่งเน้นเชิงป้องกัน เพื่อลดการชำรุดเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้า งานวิจัยครั้งนี้จึงศึกษาการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากข้อมูลผลการบำรุงรักษาจำนวน 732 ข้อมูล โดยใช้วิธี K-means Clustering และ Decision Tree Learning เพื่อสามารถนำผลจากการศึกษาไปใช้จัดลำดับความสำคัญในการวางแผนบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า ลดการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการศึกษาพบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอายุการใช้งานมากจะทำให้ค่าความเป็นฉนวนของขดลวด และน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง และเพิ่มจำนวนการพบความผิดปกติจากการตรวจสอบสภาพภายนอก จากการจัดกลุ่มข้อมูลหรือระบุ Cluster ด้วยวิธี K-means Clustering สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลออกได้เป็น 3 Cluster ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าสภาพดี เสียต้องการชำรุด และยอมรับได้ และสามารถสร้างแผนภาพการตัดสินใจด้วยวิธี Decision Tree learning ที่มีผลการทดสอบความถูกต้องอยู่ที่ 97.68% เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจ และนำไปสู่การพิจารณาเข้าบำรุงรักษา โดยหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพเสียต้องการชำรุดเป็นกลุ่มแรกที่ควรเข้าบำรุงรักษารองลงมาเป็นสภาพยอมรับได้ และสภาพดี ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** หม้อแปลงไฟฟ้า K-means Decision Tree

### 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า และเชื่อมต่อระหว่างหน่วยงานผู้ให้กับผู้ใช้งานไฟฟ้า ซึ่งหากเกิดการชำรุดเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า คุณภาพการให้บริการ รวมไปถึงอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า

การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบัน จึงมุ่งเน้นการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เพื่อลดการชำรุดเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะติดตั้งใช้งาน อีกทั้งยังสามารถวางแผนงานการบำรุงรักษา สดระยะเวลาการทำงาน หากแต่การบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ดี จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือหรือวิธีการระบุจำแนก ประเมิน หรือคาดการณ์ สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการตรวจสอบปัจจัยต่าง ๆ หรือจากการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าวิธีถ่วงน้ำหนัก หรือแนวทางที่สามารถจำแนก ประเมิน หรือคาดการณ์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ [1] ได้นำเสนอการตรวจจับการลัดวงจรภายในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออนไลน์ โดยใช้วิธี harmonic PMU (phasor measurement unit) ร่วมกับ fuzzy logic (FL) ผ่านการวิเคราะห์หาความแตกต่างของกระแส (differential current spectrum) ของ Phasor ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า [4] ได้นำเสนอระบบทำนายสุขภาพ (Prognostics Health Management : PHM) ที่ได้จากรวมผลการทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM) เพื่อตรวจสอบความ



ทนทานและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [7] ได้นำเสนอดัชนีสุขภาพที่พัฒนาสำหรับการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการรวมผลการทดสอบต่างๆ เพื่อประเมินสภาพของหม้อแปลงจากเครื่องมือทางสถิติ SPSS วิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบของหม้อแปลงและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบโปรแกรม Business Intelligent Service Maintenance Engineering (BISME) ซึ่งจากแนวทางที่สามารถจำแนก ประเมิน หรือคาดการณ์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า ตามที่ศึกษาข้างต้นพบว่าการใช้วิธีทาง Machine Learning เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถนำมาปรับใช้กับข้อมูลในระบบโปรแกรม BISME ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงศึกษาวิธีการจำแนกสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้รับจากโปรแกรม BISME โดยใช้วิธี K-means Clustering และ Decision Tree Learning เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า นำไปสู่การวางแผนบำรุงรักษาซ่อมแซม หรือสับเปลี่ยนต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากข้อมูลผลการบำรุงรักษาในระบบโปรแกรม BISME โดยใช้วิธี K-means Clustering และ Decision Tree Learning

## 3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำผลจากการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้ามาใช้จัดลำดับความสำคัญในการวางแผนบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และลดโอกาสการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะติดตั้งใช้งาน

## 4. ทฤษฎีและวิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับการวิจัยการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากผลการบำรุงรักษาที่รวบรวมได้จากโปรแกรม BISME มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

### 4.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's correlation) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวแปรแบบเชิงเส้น (Linear relationship) ในลักษณะของความสัมพันธ์เชิงบวก (+) หรือความสัมพันธ์เชิงลบ (-) ทางสถิติ ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์อยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 ตามสมการ (1)[3]

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (1)$$

$r$  = ค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน

$x$  = ข้อมูลตัวแปรที่ 1 หรือตัวแปร  $x$

$y$  = ข้อมูลตัวแปรที่ 2 หรือตัวแปร  $y$

$n$  = จำนวนข้อมูล

การทำจำนวนกลุ่มข้อมูล (Cluster) ที่เหมาะสมด้วยวิธี Hierarchical Clustering [5] เป็นวิธีการหา Cluster เป็นลำดับชั้น โดยข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันจะถูกลำดับชั้นให้ใกล้เคียงกัน ข้อมูลที่มีลักษณะแตกต่างกันจะถูกจัดลำดับชั้นให้มีความห่างกัน และระยะห่างระหว่างข้อมูลจะเป็นตัวบอกจำนวนของ Cluster ในกลุ่มข้อมูล

K-means Clustering [6] เป็นวิธีระบุ Cluster ให้ข้อมูลที่ไม่มีการสอน (unsupervised) ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย โดยการหาค่าความเหมือนหรือแตกต่างของข้อมูล ข้อมูลที่เหมือนกันจะจัดอยู่ใน cluster เดียวกัน จำนวนของ Cluster หรือจำนวนศูนย์กลาง Cluster เรียกว่า ค่า  $k$  ซึ่งเป็นไฮเปอร์พารามิเตอร์เริ่มต้นของวิธี K-means Clustering โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

กำหนดให้ชุดข้อมูลของแต่ละ Cluster เป็น  $x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^r) (i = 1, 2, \dots, k)$  ค่าศูนย์กลางของแต่ละ Cluster เป็น  $c = (c^1, c^2, \dots, c^r)$  เมื่อ  $c^j$  เป็นค่าเฉลี่ยของ  $x_1^j, x_2^j, \dots, x_k^j$  โดยที่  $i = 1, 2, \dots, r$  และระยะห่างระหว่างจุดแบบ Euclidean distance สามารถคำนวณจากสมการ (2)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (d(x_i, m_j))^2 \quad (2)$$

โดย  $d(x_i, m_j)$  เป็นระยะห่างแบบ Euclidean distance ระหว่าง  $x_i$  และศูนย์กลาง Cluster ( $m_j$ ) ในการคำนวณ จะได้รับค่า  $M = (m_1, m_2, \dots, m_j)$  โดยที่ ( $j = 1, 2, \dots, k$ ) ซึ่งจะทำกาารวนซ้ำเพื่อให้ได้ค่า  $M$  ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่า  $M_0 = (m_1, m_2, \dots, m_j)$

เมื่อ  $m_j$  เป็นระยะห่างในพื้นที่ Euclidean

ขั้นตอนที่ 2 หาระยะห่างระหว่าง  $x_i$  และ  $m_j$  ถ้า

$x_i$  ใกล้  $m_j$  โดยถูกกำหนดให้เป็นค่า  $m_p^1$

ขั้นตอนที่ 3 หาระยะห่างระหว่าง  $x_i$  และ  $m_p^1$  ถ้า

$x_i$  ใกล้  $m_p^1$  โดยถูกกำหนดให้เป็นค่า  $m_p^2$  ทำวนซ้ำไปจนกว่าค่า  $m_p$

เมื่อ  $m_p$  ไม่มีการเปลี่ยนค่า  $x_i$  ที่อยู่ใกล้  $m_p$  ใด ๆ จะถูกระบุเป็น Cluster เดียวกัน

Decision tree learning [2] เป็นวิธีการจำแนกหรือการตัดสินใจทางคณิตศาสตร์แบบบูลีน (Boolean) โดยการแบ่งแยกตามลำดับขั้นจนถึงลำดับสุดท้าย เป็นวิธีการอธิบายการตัดสินใจที่เข้าใจง่าย ซึ่งสามารถคำนวณตามสมการ (3) และ (4)

$$H(\text{set}) = -P_1 \times \log_2 P_1 - P_2 \times \log_2 P_2 \quad (3)$$

$H$  = เอนโทรปี (Entropy)

$P_1$  = ความน่าจะเป็นของการตัดสินใจรูปแบบ 1

$P_2$  = ความน่าจะเป็นของการตัดสินใจรูปแบบ 2

$$\text{Gain}(A) = H(\text{set}) - (w_1 \times H(a_1) + w_2 \times H(a_2) + \dots + w_m \times H(a_m)) \quad (4)$$

$\text{Gain}(A)$  = Information gain ของข้อมูล  $A$

$w_m$  = ค่าน้ำหนักของข้อมูลที่มี  $m$

$H(a_m)$  = เอนโทรปีของชุดข้อมูล  $a_m$

#### 4.2 วิธีดำเนินการวิจัย

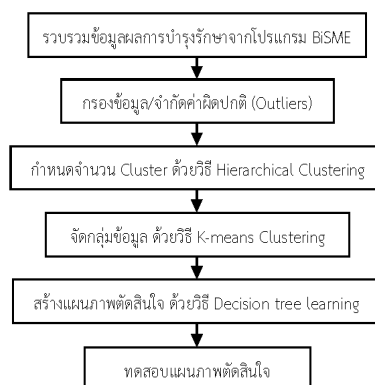
การจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดำเนินการวิจัยจากข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 33 kV โดยการรวบรวมจากโปรแกรม BISME ซึ่งประกอบไปด้วย 6 ปัจจัย ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยจากผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

ที่	รายละเอียดปัจจัย	หน่วย
1	อายุ (F1)	ปี
2	การตรวจสอบสภาพภายนอก (F2)	จำนวนที่พบ
3	ค่าความเป็นอนุวัตตลวดแรงสูง - กราวด์ (F3)	MΩ
4	ค่าความเป็นอนุวัตตลวดแรงต่ำ - กราวด์ (F4)	MΩ
5	ค่าความเป็นอนุวัตตลวดแรงสูง - แรงต่ำ (F5)	MΩ
6	ค่าความเป็นอนุวัตของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (F6)	kV/2.5 cm

การตรวจสอบสภาพภายนอก (F2) เป็นการตรวจสอบความผิดปกติที่สามารถเห็นได้จากภาพของผู้ปฏิบัติงานบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจสอบสภาพลอกตัวนำ สภาพซีลยาง สภาพสารดูดความชื้น สภาพตัวถังรวมถึงถังอะไหล่ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบกราวด์ และระดับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 732 ข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้จัดกลุ่มข้อมูลหรือยังไม่ได้ระบุ Cluster มาทำการจัดกลุ่มหรือระบุ Cluster ด้วยการใช้วิธี K-means Clustering โดยค่า  $k$  จะกำหนดจากการใช้วิธี Hierarchical Clustering เพื่อนำข้อมูลที่ผ่านมาการระบุ Cluster ดังกล่าว จำนวน 585 ข้อมูล หรือคิดเป็น

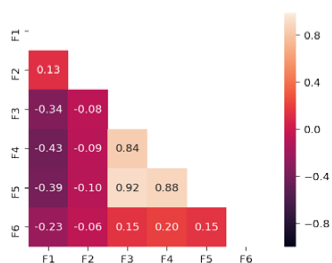


รูปที่ 1 วิธีดำเนินการวิจัย

80% ของข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า ไปสร้างแผนภาพการตัดสินใจหรือ Decision tree ด้วยวิธี Decision tree learning (Train) และจำนวน 147 ข้อมูล หรือคิดเป็น 20% ของข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับทดสอบแผนภาพการตัดสินใจ (Test) โดยมีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัยตามรูปที่ 1

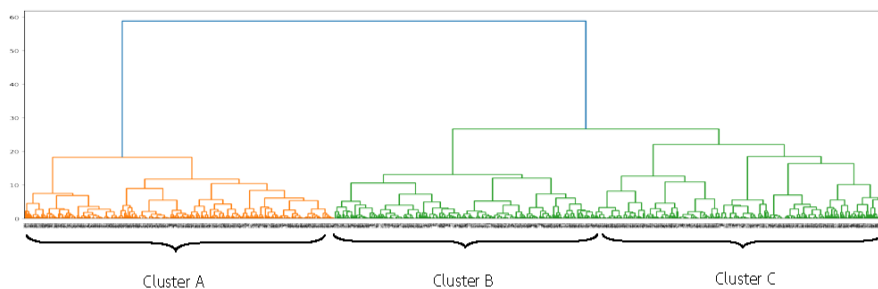
**5. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล**

การศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยแบบเพียร์สัน (Pearson's correlation) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง F3 , F4 , F5 และ F6 เป็นความสัมพันธ์เชิงบวกหรือปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะส่งผลต่อปัจจัยอีก 3 ปัจจัย ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงในทิศทางเดียวกัน และทั้ง 4 ปัจจัยดังกล่าว เป็นความสัมพันธ์เชิงลบกับ F1 และ F2 กล่าวคือ การที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่นานขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นนวนของขดลวด และน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง รวมไปถึงมีการเพิ่มจำนวนการพบความผิดปกติจากการตรวจสอบสภาพภายนอก โดยรายละเอียดความสัมพันธ์แสดงตามรูปที่ 2



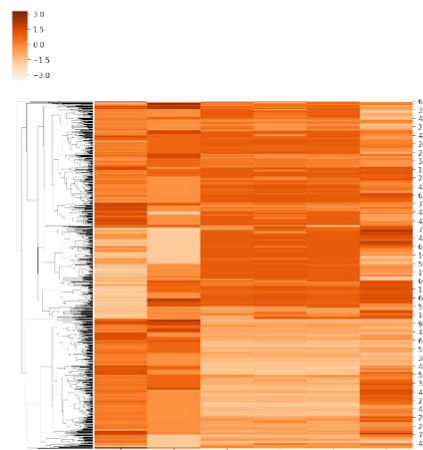
รูปที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย

การทำจำนวนกลุ่มข้อมูลหรือจำนวน Cluster ที่เหมาะสมด้วยวิธี Hierarchical Clustering พบว่า สามารถแบ่ง



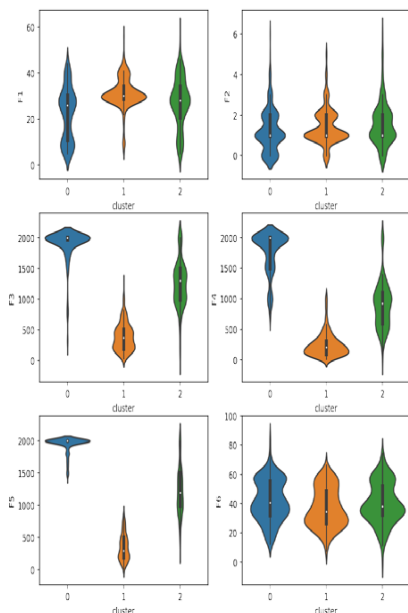
รูปที่ 3 ลำดับชั้นความแตกต่างของข้อมูล

Cluster ที่มีลำดับชั้นความแตกต่างมากที่สุดได้จำนวน 2 Cluster (Cluster กลุ่มสีส้ม และสีเขียว) ตามที่แสดงในรูปที่ 3 หากพิจารณา Cluster กลุ่มสีเขียวสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 Cluster เป็น Cluster B และ C ซึ่งทั้ง 2 Cluster ความแตกต่างกันตรงอายุ (F1) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ตามที่แสดงในรูปที่ 4 โดย Cluster B มีค่าที่อ่อนกว่า Cluster C ส่งผลให้มีอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า Cluster C และลำดับชั้นความแตกต่างของ Cluster B กับ C มีความใกล้เคียงกับ Cluster A งานวิจัยครั้งนี้จึงใช้จำนวน Cluster เท่ากับ 3 Cluster เพื่อให้สภาพหม้อแปลงไฟฟ้ามีความแตกต่างที่ละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 4 ค่าความแตกต่างของปัจจัยในแต่ละ Cluster

ผลจากการหาจำนวน Cluster ที่เหมาะสมด้วยวิธี Hierarchical Clustering ซึ่งนำมากำหนดค่า k เท่ากับ 3 สำหรับการจัดกลุ่มข้อมูล ด้วยวิธี K-means Clustering จากข้อมูลผลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 732 ข้อมูล ได้ผลการจัดกลุ่มข้อมูลเป็นไปตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 การจัดกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี K-means Clustering

Cluster 0 หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 22 ปี การตรวจสอบสภาพภายนอกพบสิ่งผิดปกติเฉลี่ย 1 ปัญหา มีค่าความเป็นฉนวนของขดลวด และน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าที่สูง จึงจัดได้ว่าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพดี (Good) ควรได้รับการบำรุงรักษาตามแผนงานปกติ หรือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มสุดท้ายในลำดับการพิจารณาบำรุงรักษา

Cluster 1 หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้มีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสูง โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 31 ปี การตรวจสอบสภาพภายนอกพบสิ่งผิดปกติเฉลี่ย 2 ปัญหา มีค่าความเป็นฉนวนของขดลวด หม้อแปลงไฟฟ้าเฉลี่ยที่น้อยกว่ามาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และเป็น Cluster ที่มีค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเฉลี่ยที่น้อยที่สุด จึงจัดได้ว่าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพเสี่ยง (Risk) ควรได้รับการรื้อถอนนำลงมาซ่อมแซม ได้แก่ การเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า การอบขดลวดไล่ความชื้น การเปลี่ยนซิลยาง เป็นต้น หรือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มแรกในลำดับการพิจารณาบำรุงรักษา

Cluster 2 หม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มนี้มีอายุการใช้งานอยู่ในช่วงเฉลี่ย 27 ปี การตรวจสอบสภาพภายนอกพบสิ่งผิดปกติเฉลี่ย 2 ปัญหา มีค่าความเป็นฉนวนของขดลวด และน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง Cluster 0 กับ 1 แต่อย่างสูงกว่ามาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จึงจัดได้ว่าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีสภาพยอมรับได้ (Acceptable) ควรได้รับการบำรุงรักษาตามแผนงานปกติ แต่อาจจะเพิ่มการเฝ้าระวังหรือเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากลุ่มที่ 2 ในลำดับการพิจารณาบำรุงรักษา

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถนำผลการบำรุงรักษาที่มีการระบุ Cluster จำนวน 585 ข้อมูล (Train) จากวิธี K-means Clustering มาสร้างแผนภาพการตัดสินใจด้วยวิธี Decision tree learning ซึ่งได้ผลการจำแนกเป็นไปตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพการตัดสินใจ (Decision tree)

โดยการทดสอบการจำแนกสภาพของแผนภาพการตัดสินใจจากข้อมูลสำหรับทดสอบ (Test) จำนวน 147 ข้อมูลพบว่า สามารถจำแนกสภาพได้ถูกต้องจำนวน 144 ข้อมูล หรือคิดเป็น 97.68%

#### 6. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อให้สามารถวางแผนหรือจัดลำดับการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) โดยการรวบรวมข้อมูลผลการบำรุงรักษาในระบบโปรแกรม BiSME จำนวน 732 ข้อมูล ซึ่งมีปัจจัยในการพิจารณาจำนวน 6 ปัจจัย ตามตารางที่ 1 และเป็นข้อมูลที่ยังไม่มีการจัดกลุ่มหรือระบุ Cluster

จากการศึกษาพบว่า หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานมากจะทำให้ค่าความเป็นฉนวนของขดลวด และน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง และเพิ่มจำนวนการพบความผิดปกติจากการตรวจสอบสภาพภายนอก จากการจัดกลุ่มข้อมูลหรือระบุ Cluster ด้วยวิธี K-means Clustering สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลออกได้เป็น 3 Cluster ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าสภาพดี หม้อแปลงไฟฟ้าสภาพเสี่ยงต่อการชำรุด และหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพยอมรับได้ โดยการนำข้อมูลที่ระบุสภาพมาสร้างแผนภาพการตัดสินใจด้วยวิธี Decision Tree learning ได้ผลตามรูปที่ 6 ซึ่งมีการทดสอบความถูกต้องอยู่ที่ 97.68% เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจการจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าจากปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัย และนำไปสู่การวางแผนบำรุงรักษาทั้งรูปแบบการบำรุงรักษา และลำดับในการพิจารณาเข้าบำรุงรักษา โดยหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพเสี่ยงต่อการชำรุดเป็นกลุ่มที่ควรเข้าบำรุงรักษาโดยเร็ว รองลงมาเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพยอมรับได้ และหม้อแปลงไฟฟ้าสภาพดี ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ ควรนำข้อมูลผลการบำรุงรักษาย้อนหลังมาจำแนกสภาพจากการศึกษา เพื่อทดสอบการจำแนกและคาดการณ์อายุของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ยังคงใช้งานต่อไป

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รับทุนจากโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] David Granados-Lieberman et al., "Harmonic PMU and Fuzzy Logic for Online Detection of Short-Circuited Turns in Transformers", *Electric Power System Research*, vol. 190, pp 1-11, Jan 2021, doi: 10.1016/j.epr.2020.106862.
- [2] F. -J. Yang, "An Extended Idea about Decision Trees," *2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2019, pp. 349-354, doi:10.119/CSD49370.2019.00068.
- [3] L. Egghe, and L. Leydesdorff, "The relation between Pearson's correlation coefficient  $r$  and Salton's cosine measure," *J. American Society for Information Science and Technology*, vol. 60, no. 5, pp. 1027-1036, Nov. 2009, doi:10.48550/arXiv.0911.1318.
- [4] Muhammad Abdilllah et al., "Prognostics Health Management (PHM) System for Power Transformer Using Kernel Extreme Learning Machine (K-ELM)", *The International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry*, 2020, pp. 1-6 , doi:10.1145/3429789.3429822
- [5] Nisha and P. J. Kaur, "Cluster quality based performance evaluation of hierarchical clustering method," *2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT)*, 2015, pp. 649-653, doi: 10.1109/NGCT.2015.7375201.
- [6] R. Kumari, Sheetanshu, M. K. Singh, R. Jha and N. K. Singh, "Anomaly detection in network traffic using K-mean clustering," *2016 3rd International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, 2016, pp. 387-393, doi: 10.1109/RAIT.2016.7507933.
- [7] W. Wattakapaboon and N. Pattanadech, "The new developed Health Index for transformer condition assessment," *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016, pp. 32-35, doi: 10.1109/CMD.2016.7757760.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล    จำเอกกิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ

รหัสประจำตัวนักศึกษา                      6310120087

## วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2557
บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต (บริหารธุรกิจ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2563

## ทุนการศึกษา

ทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ตำแหน่ง    วิศวกร ระดับ 6

สถานที่ทำงาน                                แผนกมิเตอร์และหม้อแปลง กองบริการลูกค้า ฝ่ายวิศวกรรมและบริการ  
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 (ภาคใต้) จังหวัดยะลา